

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики

Отделение/НОЦ Электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Профиль Автоматизированные системы диспетчерского управления
электроэнергетических систем

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Автоматическое регулирование частоты с использованием управления по прогноznым моделям

УДК 621.316.726: 681.51-047.72

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Д	Беляев Александр Сергеевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения электроэнергетики и электротехники	Прохоров Антон Викторович	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент школы инженерного предпринимательства	Попова Светлана Николаевна	к.э.н, доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения контроля и диагностики	Амелькович Юлия Александровна	к.т.н., доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ООП	Прохоров Антон Викторович	к.т.н.		

Томск – 2018 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Универсальные компетенции	
P1	Совершенствовать и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.
P2	Свободно пользоваться русским и иностранным языками как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.
P3	Использовать на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.
P4	Использовать представление о методологических основах научного познания и творчества, роли научной информации в развитии науки.
Профессиональные компетенции	
P5	Применять углубленные естественно-научные, математические, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности.
P6	Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа при планировании режимов работы электроэнергетических систем, проектировании, эксплуатации и обслуживании локальных и централизованных систем управления и автоматизированных систем диспетчерского управления
P7	Выполнять инновационные инженерные проекты по разработке аппаратных и программных средств управления режимами работы электроэнергетических систем, включая средства автоматизированных систем диспетчерского управления.
P8	Проводить инновационные инженерные исследования в области управления режимами электроэнергетических систем и автоматизированных систем управления.
P9	Проводить технико-экономическое обоснование проектных решений; осуществлять профессиональную деятельность руководствуясь требованиями стандартов и рынка.
P10	Проводить монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы оборудования и программного обеспечения по профилю профессиональной деятельности.
P11	Осваивать новое оборудование и программное обеспечение в сфере управления режимами работы электроэнергетических систем и автоматизации диспетчерского управления.
P12	Разрабатывать рабочую проектную и научно-техническую документацию в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами.

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Отделение/НОЦ Электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации
(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6Д	Беляеву Александру Сергеевичу

Тема работы:

Автоматическое регулирование частоты с использованием управления по прогнозным моделям	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	29.01.2018, 424/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	09.06.2018
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	<ol style="list-style-type: none">1. Техническая информация о системе автоматического вторичного регулирования частоты и перетоков активной мощности (АРЧМ);2. Параметры оценки эффективности МРС регулятора в сравнении с I регулятором:<ul style="list-style-type: none">• Максимум ошибки регулирования;• Момент времени, при котором ошибка регулирования достигает максимума;• Декремент затухания;• Перерегулирование;• Статическая ошибка регулирования;
--	--

	Значения полученных параметров должны быть не хуже, чем в случае использования I регулятора.
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Аналитический обзор принципов построения и требований к существующей системе АРЧМ; 2. Аналитический обзор актуальных задач и направлений развития системы АРЧМ; 3. Анализ особенностей задачи АРЧ в изолированной энергосистеме; 4. Исследование метода управления по прогнозным моделям применительно к задаче регулирования частоты в изолированной энергосистеме; 5. Моделирование процесса регулирования частоты с помощью MPC и I регуляторов в среде моделирования Matlab Simulink; 6. Прототипирование программного обеспечения MPC регулятора, как компонента EMS системы; 7. Тестирование разработанного прототипа регулятора в замкнутом контуре с использованием среды моделирования реального времени и передачи данных через оперативно информационный комплекс СК-2007; 8. Выполнение предпроектного анализа, планирование управления научно-техническим проектом, расчет бюджета исследования; 9. Анализ производственной безопасности, экологической безопасности, а также безопасности в чрезвычайных ситуациях. Исследование правовых и организационных вопросов обеспечения безопасности при проведении исследований.
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Осциллограммы процесса регулирования частоты в Кольской энергосистеме; 2. Календарный план-график выполнения выпускной работы; 3. Схема модели Кольской энергосистемы в MATLAB 4. Код расчетного модуля MPC регулятора на

	языке программирования MATLAB 5. Диаграмма Ганта 6. График загрузки исполнителя работ
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Попова Светлана Николаевна, к.э.н, доцент школы инженерного предпринимательства
Социальная ответственность	Амелькович Юлия Александровна, к.т.н., доцент отделения контроля и диагностики
Automatic generation control with model predictive control	Матухин Дмитрий Леонидович, к.п.н., доцент отделения иностранных языков

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:
The concept of Model Predictive Control
Принцип управления по прогнозным моделям

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	29.01.2018
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения электроэнергетики и электротехники	Прохоров Антон Викторович	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Д	Беляев Александр Сергеевич		

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа энергетики
Направление подготовки (специальность) 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
Уровень образования Магистратура
Отделение Отделение электроэнергетики и электротехники
Период выполнения Весенний семестр 2017/2018 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация (бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)
--

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	09.06.2018
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
05.02.2018	Анализ особенностей современной системы АРЧМ и принципов ее построения	5
10.02.2018	Анализ существующих проблем эксплуатации и перспектив развития систем АРЧМ	15
27.02.2018	Изучение основ принципа управления по прогнозным моделям Model Predictive Control	10
15.03.2018	Моделирование процесса регулирования частоты с использованием традиционного I регулятора и MPC регулятора	10
22.03.2018	Программная реализация алгоритма управления по прогнозным моделям на языке программирования MATLAB	15
30.03.2018	Разработка графического интерфейса прототипа MPC регулятора на языке программирования C#	15
24.04.2018	Тестирование разработанного прототипа MPC регулятора в среде моделирования реального времени	10
03.05.2018	Работа над разделом «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	5
17.05.2018	Работа над разделом «Социальная ответственность»	5
25.05.2018	Automatic generation control with model predictive control	10

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения электроэнергетики и электротехники	Прохоров Антон Викторович	к.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения электроэнергетики и электротехники	Прохоров Антон Викторович	к.т.н.		

Реферат

Актуальность. Сложность структуры, размеры и географическая распределенность объединенных электроэнергетических систем определяют актуальность задач централизованного автоматического управления их режимными параметрами. Система автоматического регулирования частоты и перетоков активной мощности (АРЧМ) является одной из основных систем централизованного управления. Основным компонентом системы АРЧМ является классический интегральный регулятор. Существующая реализация I регулятора в АРЧМ обеспечивает простое решение задачи регулирования, однако растущие требования к качеству и эффективности регулирования, а также необходимости подключения к АРЧМ все большего количества электростанций определяют актуальность разработки и внедрения новых методов автоматического регулирования для дальнейшего развития системы АРЧМ. Одним из таких методов является метод управления по прогнозным моделям (от англ. Model Predictive Control).

Цель и задачи исследования. Целью данной работы является исследование возможности применения и программная реализация регулятора на основе метода управления по прогнозным моделям для автоматического вторичного регулирования частоты.

Задачи:

1. Анализ архитектуры и задач системы Автоматического вторичного регулирования частоты и активной мощности;
2. Изучение принципа управления по прогнозным моделям Model Predictive Control;
3. Моделирование процесса регулирования частоты с использованием традиционного I регулятора и MPC регулятора;
4. Разработка прототипа MPC регулятора, предназначенного для автоматического вторичного регулирования частоты;

5. Тестирование разработанного программного модуля MPC регулятора.

Методологическая основа. При работе над диссертацией использовались основные положения теории автоматического управления, метод управления по прогнозным моделям, методы математического моделирования, метод тестирования программного обеспечения в замкнутом контуре.

Информационная база. В процессе анализа современного состояния рассматриваемых вопросов поставленная цель достигается за счет изучения научной и специальной литературы, использования ресурсов Internet, а также собственных исследований.

Новизна исследования и научные результаты. Научная новизна работы заключается в применении концептуально нового подхода применительно к задаче автоматического регулирования частоты, а также разработке прототипа MPC регулятора для задачи АРЧ. Большинство научных трудов, посвященных методу управления по прогнозным моделям, ограничиваются исследованиями в программном комплексе MATLAB и не дают однозначной оценки преимуществ и недостатков MPC в сравнении с традиционными (P)I регуляторами. Полученный опыт исследователей, а также собственные результаты моделирования в ПК MATLAB доказали эффективность использования MPC для решения задач АРЧ.

Разработан прототип программного приложения MPC регулятора с использованием языков программирования MATLAB и C#. Выполнено исследование разработанного прототипа с помощью метода тестирования в замкнутом контуре (Software in the Loop Testing) с использованием среды моделирования реального времени.

Объектом исследования магистерской диссертации является система Автоматического вторичного регулирования частоты и активной мощности.

Предметом исследования автоматический регулятор частоты системы АРЧМ.

Апробация работы: публикация материалов в сборниках VIII международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи – 2017» (г. Самара 01-05 октября 2017).

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа эффективности применения метода управления по прогнозным моделям для решения задачи автоматического регулирования частоты, в том числе, в сравнении с применяемым в настоящее время I регулятором;
2. Результаты разработки прототипа МРС регулятора;
3. Результаты исследований разработанного прототипа в среде моделирования реального времени.

Практическая значимость. Разработанный на базе метода МРС вторичный регулятор частоты может использоваться в качестве прототипа при разработке системы АРЧМ нового типа.

Структура работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, 5 приложений. Текстовая часть проиллюстрирована 49 рисунками, 20 таблицами, список литературных источников включает 56 позиций.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Глава 1 содержит описание существующих систем Автоматического вторичного регулирования частоты и активной мощности, а именно их назначение, архитектуру и техническую реализацию. В данной главе также рассмотрены нормативные документы, регламентирующие требования к качеству регулирования частоты и системе АРЧМ. Сформулированы и обоснованы цели и задачи работы.

В главе 2 выполнено исследование метода управления по прогнозным моделям применительно к задаче регулирования частоты в изолированной энергосистеме. Описана математическая модель объекта регулирования, являющаяся основой для разработки регулятора на базе метода управления по прогнозным моделям. Выполнено сравнение эффективности регулирования частоты с помощью традиционного интегрального регулятора и MPC регулятора в программном комплексе MATLAB Simulink.

В главе 3 выполнена алгоритмизация метода управления по прогнозным моделям. Разработан прототип MPC регулятора с использованием языков программирования MATLAB и C#. Проведено тестирование разработанного прототипа в замкнутом контуре с использованием среды моделирования реального времени (Всережимный моделирующий комплекс реального времени). Выполнен анализ результатов тестирования.

Глава 4 посвящена вопросам финансового менеджмента, ресурсоэффективности и ресурсосбережения применительно к исследованию. Выполнены предпроектный анализ, планирование управления научно-техническим проектом, расчет бюджета исследования.

В главе 5 рассмотрены вопросы социальной ответственности, к которым относится анализ производственной безопасности, экологической безопасности, рассмотрены вопросы безопасности в чрезвычайных ситуациях

и правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при проведении исследований.

Термины и сокращения

АОП	– автоматический ограничитель перетока мощности
АОТП	– автоматический ограничитель токовой перегрузки
АРП	– автоматическое регулирование перетока активной мощности
АРПЧ	– автоматическое регулирование перетока активной мощности с коррекцией по частоте
АРЧ	– автоматическое регулирование частоты
АРЧМ	– автоматическое регулирование частоты и перетоков активной мощности
БДРВ	– база данных реального времени
ВЛ	– воздушная линия электропередач
ГРАМ	– групповой регулятор активной мощности
ГЭС	– гидроэлектростанция
ЕЭС	– Единая энергетическая система
ИУ	– иерархическое управление
КДУ	– коэффициент долевого участия
КПОС	– серверная программа ОИК СК-2007 «Контроль перетоков в опасных сечениях»
ЛЭП	– линии электропередачи
ОДУ	– филиал АО «СО ЕЭС» Объединенное диспетчерское управление
ОИ	– оперативная информация
ОИК СК-2007	– оперативно-информационный комплекс СК-2007
ОМП	– ограничение мертвой полосы
ОЭС	– объединенная энергетическая система
ПА	– противоаварийная автоматика

ПТК	– программно-технический комплекс
РБД	– реляционная база данных
РЭС	– регулирующая электростанция
САУМ	– система автоматического управления мощностью
ССПИ	– система сбора и передачи информации
СТМ	– сервер телемеханики
СО	– стандарт организации
ТИ	– параметр оперативной информации категории «телеизмерение»
ТМ	– телемеханика
ТС	– параметр оперативной информации категории «телесигнал»
ТЭС	– тепловая электростанция
УПО	– унифицированное программное обеспечение
ЦДУ	– центральное диспетчерское управление (Исполнительный аппарат АО «СО ЕЭС»)
ЦКС	– центральная координирующая система
ЦППС	– центральная приемо-передающая станция
ЦС	– централизованная система
Блокирование	– прекращение действий некоторой функции при появлении блокирующих событий
Входные данные	– весь объем данных, который модуль или подсистема используют в своей работе
Выходные данные	– весь объем данных, который модуль или подсистема изменяют в процессе своей работы
Регулятор	– автоматический регулятор перетока активной мощности и частоты. Имеет четыре режима работы: АРЧ, АРП, АРПЧ

Оглавление

Термины и сокращения.....	12
Введение.....	16
Глава 1. Особенности современной системы АРЧМ.....	17
1.1. Теоретические сведения о регулировании частоты и перетоков активной мощности в энергосистемах РФ	17
1.2. Концепция автоматического вторичного регулирования частоты и перетоков активной мощности (АРЧМ)	19
1.3. Комплекс технических средств систем АРЧМ	23
1.4. Существующие проблемы эксплуатации и перспективы развития систем АРЧМ	27
1.5. Цель и задачи исследования	35
Глава 2. Управление по прогнозным моделям (Model Predictive control)	38
2.2. Принцип регулирования на основе метода управления по прогнозным моделям	39
2.2. Формирование математической модели объекта регулирования	41
2.3. Алгоритм расчета управляющих воздействий на основе метода управления по прогнозным моделям	47
2.4. Обоснование выбора среды моделирования	49
2.5. Моделирование процесса регулирования частоты	50
Глава 3. Программная реализация и тестирование MPC регулятора	65
3.1. Программная реализация алгоритма расчета управляющих воздействий	66
3.2. Программная реализация алгоритма и разработка графического интерфейса MPC регулятора	70
3.3. Обоснование выбора среды моделирования	74
3.4. Реализация информационного обмена между MPC регулятором, СК-2007 и средой моделирования	75
3.5. Тестирование разработанного регулятора	81
3.6. Анализ влияния неточности задания параметров математической модели на качество регулирования	92
3.7. Заключение к Главе 3	95
Заключение.....	97
Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	100
4.1. Предпроектный анализ	100
4.2. Планирование управления научно-техническим проектом	101
4.3. Бюджет проекта	104
4.4. Ожидаемая эффективность и эффекты проекта	106
Глава 5. Социальная ответственность	110

5.1. Производственная безопасность	110
5.2. Экологическая безопасность	118
5.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	119
5.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	123
Список использованной литературы	125
Приложение А: Схема модели Кольской энергосистемы в MATLAB	130
Приложение Б: Код расчетного модуля MPC регулятора на языке программирования MATLAB	131
Приложение В: Диаграмма Ганта	133
Приложение Г: График загрузки исполнителя работ	134
Приложение Д.....	135

Введение

В настоящее время в ЕЭС России для поддержания номинального значения частоты и заданных значений перетоков используется информационно-управляющая система автоматического вторичного регулирования частоты и активной мощности (АРЧМ). Основным компонентом системы АРЧМ является классический регулятор интегрального действия (I регулятор), который формирует величину регулирующего воздействия пропорционально интегралу отклонения регулируемого параметра от заданного значения по времени.

Существующая реализация I регулятора в АРЧМ обеспечивает простое решение задачи управления частотой и перетоками, однако с ростом количества регулирующих электростанций и контролируемых сечений, а также требований к качеству и эффективности регулирования, задача АРЧМ требует поиска новых решений, в том числе применения новых методов регулирования.

Одним из таких методов является метод управления по прогнозным моделям – Model Predictive Control (MPC). Перспективность применения данного метода для задач АРЧМ подчеркивается в ряде зарубежных публикаций. Однако детальные исследования возможности его применения в качестве методологической основы для построения систем АРЧМ нового поколения отсутствуют. Так же как и отсутствует информация о существующих программных реализациях регуляторов на базе данного метода.

В данной работе исследуется эффективность применения метода MPC для решения одной из основных задач систем АРЧМ – задачи АРЧ. Также выполнена программная реализация АРЧ регулятора на базе MPC и его тестирование с помощью моделирующего комплекса реального времени.

Глава 1. Особенности современной системы АРЧМ

1.1. Теоретические сведения о регулировании частоты и перетоков активной мощности в энергосистемах РФ

Требования к регулированию частоты и активной мощности приведены в ГОСТ Р 55890-2013 «Регулирование частоты и перетоков активной мощности. Нормы и требования» [1]. Регулирование режима работы энергосистемы по частоте и активной мощности сводится к постоянному поддержанию баланса мощности между генераторами и потребителями при номинальной частоте. Практически регулирование режима по частоте и активной мощности обеспечивается регулированием мощности генераторов электростанций в соответствии с плановыми и внеплановыми нагрузками.

Согласно [1] выделяются следующие основные требования к регулированию режима по частоте и активной мощности:

1. Частота электрического тока в нормальном режиме работы должна быть номинальной – 50 Гц с отклонениями не более $\pm 0,05$ Гц (нормально допустимые) и кратковременно не более $\pm 0,2$ Гц (максимально допустимые). При этом восстановление отклонений частоты до нормально допустимых должно обеспечиваться за время не более 15 минут;
2. Перетоки мощности в основной сети ЕЭС не должны выходить за пределы установленных допустимых перетоков;
3. Суммарные обменные мощности между отдельными энергосистемами (сальдо перетоков мощности по внешним связям) при номинальной частоте должны соответствовать заданным с необходимой точностью, а внутри отдельных энергосистем мощности электростанций должны соответствовать заданным;
4. Функции поддержания заданного значения частоты в синхронной зоне, регулирования внешних перетоков областей регулирования, ограничения

перетоков активной мощности в контролируемых сечениях должно выполнять вторичное регулирование;

5. Поддержание заданного значения частоты должно осуществляться путем регулирования частоты в синхронной зоне и/или регулирования внешних перетоков областей регулирования с коррекцией по частоте;

6. Ограничение перетоков активной мощности в контролируемых сечениях должно являться приоритетным по отношению к поддержанию заданного значения частоты или внешнего перетока области регулирования.

Выполнение этих требований обеспечивается комплексом технических и организационных мероприятий, среди которых принято выделять три вида регулирования: первичное регулирование, вторичное регулирование, третичное регулирование.

Первичное регулирование - процесс мобилизации первичной регулирующей мощности электростанций и энергосистем при возникновении небаланса мощности, заканчивающийся установлением неуравновешенного баланса мощности при новой частоте.

Вторичное регулирование - процесс восстановления планового баланса мощности путем использования вторичной регулирующей мощности для компенсации возникшего небаланса мощности, ликвидации перегрузки транзитных связей, восстановления частоты и потраченных при действии первичного регулирования резервов первичной регулирующей мощности.

Вторичное регулирование может осуществляться автоматически либо оперативно вручную.

Третичное регулирование – оперативное регулирование мощности специально выделенных электростанций третичного регулирования в целях восстановления вторичного резерва по мере его исчерпания, а также для осуществления оперативной коррекции режима в иных целях. Для третичного регулирования используются пуск-останов гидроагрегатов,

эпизодическое изменение мощности энергоблоков ТЭС и АЭС, перевод агрегатов ГАЭС в двигательный или генераторный режим.

1.2. Концепция автоматического вторичного регулирования частоты и перетоков активной мощности (АРЧМ)

Автоматическое вторичное регулирование частоты и активной мощности обеспечивается с помощью информационно-управляющей системы ЦКС/ЦС АРЧМ. Система ЦКС/ЦС АРЧМ имеет иерархическую структуру. Верхним уровнем является ЦКС АРЧМ ЕЭС, которая осуществляет астатическое регулирование частоты электрического тока во всем энергообъединении, включая ЕЭС России и работающие параллельно с ЕЭС энергосистемы стран СНГ и Балтии, а также ограничение перетоков активной мощности по слабым внутренним и внешним сечениям ОЭС Центра.

Средний уровень – ЦС АРЧМ, располагается в диспетчерских пунктах ОЭС/ЭС. В разных ОЭС/ЭС ЦС АРЧМ выполняет разные функции.

Нижний уровень – общестанционное устройство с программно-техническим комплексом (ПТК низового уровня) на регулирующих электростанциях [2].

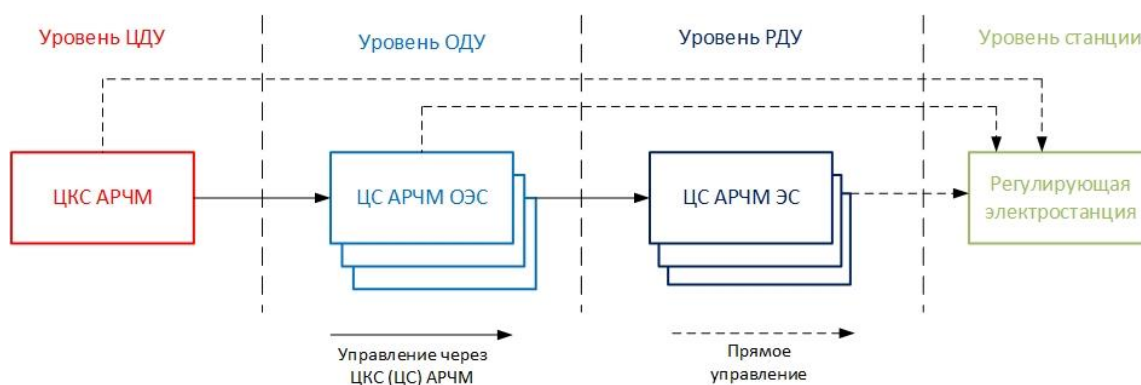


Рисунок 1 - Структура системы АРЧМ [3]

ЦС АРЧМ на основе поступающей телемеханической информации о состоянии и режимах работы энергосистемы, а также информации о

состоянии и режиме работы регулирующих станций, в соответствии с функциями и алгоритмами, реализованными в системе, вырабатывает управляющие воздействия в виде заданий вторичной мощности, которые по каналам телеуправления передаются в ПТК низового уровня регулирующих электростанций (РЭС). Текущее задание на выдачу вторичной мощности для каждого из объектов управления формируется интегральным регулятором ЦКС/ЦС АРЧМ (с циклом 1 секунда) путем суммирования очередного приращения с ранее выданным заданием, передается по каналу телеуправления непрерывно, и должно вводиться в ПТК низового уровня объектов управления в виде задания вторичной мощности дополнительно к заданию плановой мощности. Положительное вторичное задание означает требование на загрузку, отрицательное – на разгрузку.

Диспетчеры и технологи энергосистем со своих рабочих мест контролируют работу систем АРЧМ, но изменять их настройки разрешено только технологам СЭР.

ПТК низового уровня регулирующей электростанции, получая управляющее воздействие от ЦКС/ЦС АРЧМ, обеспечивает распределение и отработку этого управляющего воздействия между агрегатами своей регулирующей электростанции. В ПТК низового уровня формируется, собирается и передается на верхний уровень в ЦКС/ЦС АРЧМ вся необходимая информация о состоянии самого ПТК низового уровня и режиме работы регулирующей электростанции.

Основные функции систем АРЧМ следующие:

- *Автоматическое астатическое регулирование частоты (режим АРЧ)* в ЕЭС России и в работающих синхронно с ней энергосистемах стран СНГ и Балтии осуществляется с помощью системы ЦКС АРЧМ с воздействием на регулирующие ГЭС и энергоблоки ТЭС напрямую или через ЦС АРЧМ ОЭС. В ЦС АРЧМ также предусмотрен режим АРЧ, необходимый в случае изолированной работы ОЭС;

- *Автоматическое ограничение перетоков мощности (токовой перегрузки) (режим АО(Т)П)* по слабым внутренним и внешним сечениям энергообъединения. При реализации этой функции система АРЧМ постоянно контролирует перетоки активной мощности (ток) по ряду слабых сечений, и в случае возникновения перегрузки, то есть при превышении каким-либо контролируемым перетоком заданного максимально допустимого значения в том или ином направлении передачи мощности (уставки АО(Т)П), по возможности максимально быстро устраняет эту перегрузку путем выдачи управляющих воздействий на регулирующие станции и энергоблоки. Поскольку режим АО(Т)П является начальной ступенью противоаварийной автоматики и по мере своих возможностей предотвращает нарушение устойчивости, ему дается приоритет перед другими режимами. В настоящее время этот режим является основным для ЦС АРЧМ.

- *Автоматическое регулирование суммарного перетока по внешним связям энергообъединения с коррекцией по частоте (режим АРПЧ).* Особенность этого режима регулирования заключается в том, что система АРЧМ реагирует на небалансы мощности, возникающие только в собственном районе регулирования и не реагирует на возмущения в районах регулирования других систем АРЧМ, не препятствуя действию первичного регулирования. В ЦС АРЧМ данный режим также предусмотрен на случай регулирования суммарного внешнего перетока своей ОЭС или при необходимости регулирования суммарного внешнего перетока по заданному сечению с коррекцией по частоте. Следует отметить, что система АРЧМ, работающая в режиме АРПЧ, при необходимости может быть переведена в режим регулирования частоты (АРЧ) или в режим регулирования перетока (АРП);

- *Регулирование режима ЕЭС путем отработки команд от ЦКС АРЧМ с приоритетом собственных АО(Т)П.* Данный режим является также основным режимом работы ЦС АРЧМ. При этом станции и энергоблоки в ОЭС/ЭС могут участвовать в качестве объектов управления одновременно

для двух уровней – собственной ЦС АРЧМ ОЭС и ЦКС АРЧМ ЕЭС, но с приоритетом собственных АО(Т)П. Задание с вышестоящего уровня блокируется, если оно направлено противоположно действию собственных ограничителей перетоков (при возникновении перегрузки или нахождении одного из контролируемых перетоков в зоне минимального запаса, если выполнение задания от ЦКС АРЧМ может вызвать перегрузку этого сечения).

Таким образом, резюмируя информацию, приведенную в пункте 1.2, необходимо отметить, что основным компонентом системы АРЧМ является интегральный регулятор, работающий в нескольких режимах – АРЧ, АРП, АРПЧ, АОП, АОТП. Требования к режимам работы регулятора определяются согласно задачам, решаемым им в конкретном режиме. Основным параметр настройки регулятора – это коэффициент интегральной составляющей. В режиме регулирования частоты и перетоков постоянная интегрирования вторичного регулятора составляет 50-100 секунд, а в режиме ограничения перетоков 30-40 секунд. [5]

На действие регулятора также накладывается ограничение со стороны норм участия генерирующего оборудования во вторичном регулировании. Максимальная скорость изменения мощности гидроагрегата при вторичном регулировании может быть задана в абсолютных единицах (МВт/сек) и относительных единицах (%/сек) и должна быть ограничена сверху значением $\sim 0,4 \cdot V_{max}$, где V_{max} – максимально допустимая по гарантиям регулирования скорость движения регулирующих органов гидроагрегата, установленная в заводских паспортных данных на гидроагрегат и уточненная по результатам натурных испытаний. [56]

Для ТЭС – согласно Нормам участия генерирующего оборудования тепловых электростанций, в автоматическом вторичном регулировании частоты и перетоков активной мощности [6], изменение вторичной мощности энергоблока по заданиям от ЦКС/ЦС АРЧМ выполняется со скоростью до

1% от $P_{\text{ном}}$ /мин. Максимальная величина задания вторичной мощности – 5% от $P_{\text{ном}}$, в пределах регулировочного диапазона. Под $P_{\text{ном}}$ подразумевается номинальная мощность генерирующего оборудования в мегаваттах для ТЭС, участвующих в АВРЧМ.

1.3. Комплекс технических средств систем АРЧМ

Цифровые системы АРЧМ реализуются на базе современных технических средств вычислительной техники, связи и телемеханики при максимальном использовании уже имеющихся аппаратуры, программного обеспечения и каналов связи.

ПТК низового уровня на регулирующих станциях выполняется на базе современных микроконтроллеров. В этом же устройстве реализованы приемник и передатчик сигналов телемеханики с библиотекой возможных протоколов передачи данных. Приемник и передатчик используются для приема на регулирующих станциях управляющего воздействия и нескольких телесигналов управления ТС от ЦС АРЧМ, а также для передачи в ЦС АРЧМ информации о состоянии самого устройства системы управления мощностью и режиме регулирующей станции.

ЦС АРЧМ (Рисунок 2) реализуется на базе стандартного программно-аппаратного комплекса СК-2007 на двух отдельных выделенных серверах, один из которых является основным, а другой служит в качестве «горячего» резерва. При этом выдерживается основной принцип, что цифровые системы ЦС АРЧМ выполняются в единой технической, информационной и системной программной среде с ОИК в диспетчерских пунктах (ДП).

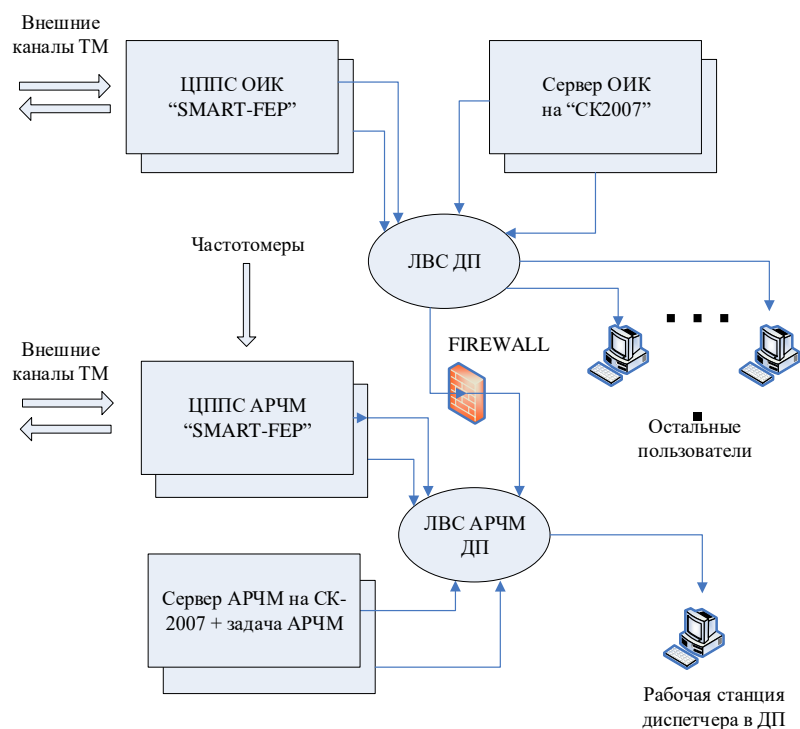


Рисунок 2 - Структурная схема ЦС АРЧМ в диспетчерском пункте на базе СК-2007 [7]

Для сбора информации о состоянии объекта регулирования и передачи управляющего воздействия на регулируемую станцию используются либо имеющиеся в ДП центральные приемо-передающие станции общие с ОИК, либо как опция - отдельная пара ЦППС для системы АРЧМ, которые выполнены на базе микроконтроллеров SMART-FER. ЦППС связаны между собой каналами для обмена данными, и к ним подключены цифровые частотомеры, обеспечивающие точность измерения частоты 1 мГц.

Для технологов ДП предусмотрено автоматизированное рабочее место, с которого технолог может наблюдать и контролировать работу системы АРЧМ, а также при необходимости управлять ее работой, задавая путем ручного ввода через клавиатуру дисплея различные параметры настройки. Все остальные пользователи сети диспетчерского центра могут только наблюдать за работой системы АРЧМ, но ни в коем случае не могут вмешиваться в ее работу. Сервера АРЧМ, ЦППС и рабочая станция диспетчера в ДП ОЭС связаны между собой локальной вычислительной сетью (ЛВС АРЧМ), которая соединена с ЛВС ДП через межсетевой экран

(устройство FIREWALL), предотвращающий любое внешнее несанкционированное вмешательство в работу АРЧМ. Таким способом обеспечиваются требования безопасности автоматической системы АРЧМ.

Через локальную вычислительную сеть система АРЧМ связана и обменивается при необходимости информацией с программами, имеющимися в составе ОИК СК-2007, в частности с программой контроля перетоков по опасным сечениям (КПОС) в которой определяются максимально допустимые перетоки по контролируемым сечениям, используемые в качестве уставок АОП или системой мониторинга токовых нагрузок (СМТН), в которой рассчитываются уставки АОТП.

Для сбора информации о режиме и состоянии объекта для работы систем АРЧМ используются устройства и каналы телемеханики, а для передачи управляющего воздействия и сигналов управления на регулирующие станции между ними и ДП используются каналы телеуправления. При этом транспортная задержка при передаче управляющего воздействия должна быть не более 1 сек.

Достоверная телемеханическая информация в полном объеме, поступающая с минимальным запаздыванием, совершенно необходима для правильного и непрерывного функционирования системы АРЧМ. Прекращение поступления информации по какому-либо каналу равносильно обрыву обратной связи интегрального регулятора, что может привести (при отсутствии эффективно действующих защит и блокировок) к произвольной загрузке или разгрузке энергоблоков ТЭС и гидроагрегатов ГЭС, а также к системной аварии.

Поэтому к качеству информации для системы АРЧМ предъявляются высокие требования, и там, где возможно, используются несколько дублей телеизмерения, сложные алгоритмы достоверизации информации и другие меры для повышения надежности и качества информации. Так, телеизмерения перетоков активной мощности должны иметь точность не хуже 1,5% от полного диапазона измерения и поступать с задержкой не более

5 сек для подсистемы регулирования и не более 1 сек для подсистемы ограничения перетоков.

Измерение частоты (при работе системы АРЧМ в режиме АРЧ и АРПЧ) производится цифровыми частотомерами, имеющими точность не хуже 1 мГц и цикличность не менее 1 сек. Такие высокие требования к качеству измерения частоты, объясняются тем, что в реальном энергообъединении в нормальных режимах допустимые отклонения частоты от 50 Гц не должны превышать 0,05 Гц.

По указанным выше причинам передача сигналов телеуправления (значение внеплановой мощности) на регулирующие станции также должна производиться с точностью не хуже 1% и запаздыванием не более 1 сек.

Перечень входной телемеханической информации реального времени для ЦС АРЧМ:

- перетоки активной мощности по всем ВЛ, входящим в контролируемые сечения, по возможности с обеих сторон линий и с несколькими дублями;
- частота сети в контрольных точках ОЭС;
- частота сети на шинах регулирующих станций;
- внеплановое задание с каждой из регулирующих станций, полученное, запомненное и отработанное системой управления мощностью;
- значения текущих регулировочных диапазонов каждой из регулирующих станций (соответственно на загрузку и разгрузку – 2ТИ);
- обобщенный сигнал (ТС) о состоянии систем управления мощностью (готовность к приему и отработке управляющего воздействия каждого ПТК низового уровня);

Перечень выходной телемеханической информации реального времени для ЦС АРЧМ (на каждый объект регулирования):

- управляющее воздействие (задание внеплановой мощности) на регулирующие станции;

- сигналы (ЗТС) «включить/отключить/выполнить» ПТК низового уровня;
- сигнал (1ТС) «действует АОП».

Прием и передача телеинформации должны осуществляться по двум выделенным цифровым каналам связи (основному и резервному), организованных по географически разделенным трассам, в протоколе МЭК 60870-5-101 или МЭК 60870-5-104. Безопасность приема и передачи телеинформации должна обеспечиваться резервированием каналов передачи данных путем использования каналов от разных провайдеров (операторов связи). [8]

1.4. Существующие проблемы эксплуатации и перспективы развития систем АРЧМ

С целью определения возможных путей развития системы АРЧМ, а также поиска информации относительно проблем и вызовов, связанных с задачей регулирования частоты и перетоков, необходимо провести анализ отечественной и зарубежной литературы.

В [9] определены следующие направления развития системы АРЧМ:

1. Увеличение количества подключаемых к ЦС/ЦКС АРЧМ сертифицированных энергоблоков ТЭС для возможности развития рынка системных услуг по АВРЧМ;
2. Проведение работ по исследованию возможностей управления ВПТ от ЦС/ЦКС АРЧМ;
3. Совершенствование алгоритмов управления и технических комплексов систем АРЧМ для наиболее оптимального управления электростанциями, с учетом их маневренности, месторасположения и наличия резервов регулирования, включая:

- Разработку алгоритмов учета суточной выработки ГЭС при их управлении от ЦС/ЦКС АРЧМ с их интеграцией в алгоритмы УПО АРЧМ;
- Автоматизацию процесса формирования КДУ регулирующих объектов ЦС/ЦКС АРЧМ с использованием результатов программ оценки состояния, функционирующих на базе ОИК (SCADA), с целью достижения максимальной эффективности функций регулирования и ограничения перетоков мощности по сечениям.

Помимо определения направлений развития системы АРЧМ стоит уделить внимание ее особенностям, которые подробно изложены в [10]. Для участия в автоматическом вторичном регулировании привлекаются в основном ГЭС, являющиеся высокоманевренными источниками генерации, способными увеличивать или снижать активную мощность по заданиям центрального регулятора с необходимым быстродействием.

Существуют эксплуатационные ограничения по использованию полного потенциала электростанций. Например, в период паводка из-за ограничений по уровню выработки электроэнергии и мощности участвующие в регулировании ГЭС вынуждены открывать дополнительные объемы холостых сбросов для пропуска воды, тем самым снижая эффективность использования гидроресурсов. С целью повышения эффективности использования гидроресурсов в паводковый период автоматическое вторичное регулирование частоты в ЕЭС России осуществляется с привлечением энергоблоков ТЭС как без участия, так и при совместном участии с ГЭС. Требования стандарта по регулированию частоты и перетоков предусматривают, что максимальная величина изменения мощности энергоблока ТЭС при участии в АРЧМ не может превышать 5% от его номинальной мощности, а максимальная скорость изменения активной мощности не может превышать 1% от его номинальной мощности в минуту, что является условием обеспечения надежного режима работы оборудования.

Ограничения по выдаче вторичной мощности с помощью агрегатов ГЭС устанавливаются в индивидуальном порядке. Из вышесказанного можно отметить, что на действия вторичных регуляторов накладываются технические ограничения генерирующего оборудования, которые могут отличаться для различных типов электростанций, агрегатов и, в идеале, должны учитываться при распределении задания активной мощности. То есть параметры настройки регуляторов должны задаваться, исходя из ограничений по технологической эксплуатации оборудования. Например, в случае интегрального регулятора это достигается за счет увеличения постоянной времени интегрирования, что приводит к увеличению времени регулирования, но при этом исключается возможность нарушения устойчивости при действии регулятора.

В ЦКС АРЧМ ЕЭС общее задание на изменение мощности энергоблоков в каждом цикле управления делится на приращение задания каждому из энергоблоков пропорционально их коэффициентам долевого участия (КДУ) в регулировании. С целью эффективного использования резервов вторичного регулирования КДУ каждого из энергоблоков задаются пропорционально величинам их диапазонов регулирования (заданные КДУ). Текущее задание на выдачу вторичной мощности для каждого из энергоблоков формируется интегральным регулятором ЦК АРЧМ ЕЭС (с циклом 1 с) путем суммирования очередного приращения с ранее выданным заданием, передается по каналу телеуправления непрерывно и должно вводиться в САУМ энергоблоков ТЭС (ГРАМ энергоблоков ГЭС) в виде задания вторичной мощности дополнительно к заданию плановой мощности. На данный момент КДУ задается технологом системы АРЧМ вручную и при изменении схемно-режимной ситуации КДУ подлежит пересчету, поэтому как было сказано выше, одним из перспективных направлений развития системы АРЧМ является автоматизированный расчет КДУ.

В зарубежной литературе уделяется внимание регулированию параметров технологических процессов на основе решения оптимизационных задач, что

позволяет повысить эффективность регулирования. В частности, данному вопросу посвящена работа [11]. В современных электроэнергетических системах традиционные нагрузки изменяются медленно и их изменение может быть предсказано с высокой точностью, поэтому традиционная система АРЧМ не несет большой потери эффективности регулирования при следовании суточному графику нагрузки. Однако распространение возобновляемых источников энергии влечет за собой увеличение нерегулярных колебаний нагрузки. Поэтому традиционная система АРЧМ может стать менее эффективной с экономической точки зрения. В статье предлагается новая модификация обычной системы АРЧМ для автоматического поддержания частоты и достижения оптимальной выработки мощности. В статье решается задача оптимизации работы АРЧМ с использованием так называемого подхода Economic dispatch (ED). В основе данного подхода реализовано использование модифицированной системы АРЧМ, которая в иностранной литературе называется economic AGC. Помимо поддержания номинального значения частоты, она позволяет оптимально управлять перетоками мощности между ОЭС (и/или отдельными единицами генерирующего оборудования) для баланса между генерацией и нагрузкой во всей объединенной электроэнергетической системе (и / или в пределах ОЭС) для достижения экономической эффективности регулирования. ED это краткосрочное определение оптимальной выработки мощности энергоблоками для компенсации возникающих небалансов при минимально возможных затратах производства электроэнергии. Проблема ED решается специализированным компьютерным программным обеспечением, которое должно удовлетворять эксплуатационным и системным ограничениям с точки зрения использования доступных ресурсов. Основная идея заключается в том, что для компенсации небалансов сначала необходимо использовать набор генераторов с наименьшими предельными издержками при производстве электроэнергии. Опыт данной статьи

доказывает актуальность использования оптимизационных алгоритмов для решения задач регулирования частоты и перетоков активной мощности.

Также стоит уделить внимание литературе, посвященной недостаткам алгоритмов современных регуляторов. В существующей реализации системы АРЧМ центральное место занимает классический I регулятор, который вырабатывает величину управляющего воздействия пропорционально интегралу отклонения контролируемого параметра от его уставки. I регулятор прост в своем исполнении и справляется с задачами, которые необходимо решать при регулировании частоты и перетоков. Но современные тенденции и подход к регулированию требует усложнения реализации регуляторов. С точки зрения подхода к регулированию параметров технологического процесса регуляторы должны обеспечивать необходимое качество регулирования [12]. Выбор критерия качества регулирования зависит от цели, для которой используется регулятор. Целью может быть:

- поддержание постоянного значения параметра;
- слежение за изменением уставки или программное управление;

Для задач АРЧМ наиболее важными факторами являются:

- форма отклика на внешние возмущения (время установления, перерегулирование и др.);
- робастность по отношению к разбросу параметров объекта управления;

Помимо требований к качеству регулирования, к регуляторам предъявляются требования, связанные с простотой настройки их параметров. В общей теории автоматического управления структура регулятора выбирается исходя из модели объекта управления. При этом более сложным объектам управления соответствуют более сложные регуляторы. В случае системы АРЧМ – это интегральный I регулятор.

В некоторых системах уместно использовать PID регуляторы. Но одна из основных проблем, связанных с использованием PID регуляторов, это сложная эксплуатация. Во многих PID регуляторах дифференциальная составляющая выключена только потому, что ее трудно настроить. Поэтому основные усилия исследователей в настоящее время сосредоточены на поиске надежных методов автоматической настройки регуляторов. Неоптимальная настройка ведет к повышенному расходу сырья и энергии и повышает износ оборудования [13].

Автоматическая настройка и адаптация являются самыми актуальными задачами при построении PID-регуляторов. Остается много нерешенных проблем, связанных с качеством настройки регуляторов, влиянием нелинейностей объекта управления и внешних возмущений. При автоматической настройке и адаптации используются те же методы идентификации и расчета параметров регулятора, что и в ручном режиме, однако они выполняются автоматически. Наиболее эффективными являются методы настройки с применением компьютера, временно включенного в контур регулирования [14].

Также необходимо уделять внимание решению регуляторами оптимизационных задач, которые отвечают за эффективное использование ресурсов и технологического оборудования. Алгоритм расчета управляющих воздействий современных регуляторов должен поддерживать такую возможность. Таким образом, к современным регуляторам предъявляются требования по обеспечению высокого качества регулирования, с возможностью решения оптимизационных задач, а также обеспечение гибкой и простой настройки.

Одним из современных формализованных подходов к анализу и синтезу систем управления, базирующихся на математических методах оптимизации, является теория управления динамическими объектами с использованием прогнозирующих моделей - Model Predictive Control (MPC) [15]. MPC регуляторы используются для оптимизации контролируемых параметров при

условии соблюдения ограничений на входе и выходе замкнутой системы. Возможность рассчитывать значения контролируемого параметра и управляющих воздействий на некотором будущем интервале времени позволяет выполнять более точный расчет управляющих воздействий на каждом шаге дискретизации. Данное обстоятельство является преимуществом MPC перед классическим I регулятором [16].

В зарубежной литературе активно исследуется применение MPC для решения задач АРЧМ и повышения качества регулирования. Например, в статье [17] рассматривается сравнение MPC и PI регуляторов для решения задач регулирования частоты и перетоков. В задачи исследования, описанного в данной статье, входило регулирование частоты и межсистемных перетоков в энергосистеме, состоящей из пяти зон, в четырех из которых использовались ТЭС, а в одной – ГЭС. Результаты опытов показали, что регулирование с помощью MPC является более робастным, чем в случае с применением PI регулятора.

Помимо решения задач АРЧМ, в зарубежной литературе рассматриваются вопросы применения MPC для управления устройствами FACTS [18]. Более совершенная система управления на базе MPC обеспечивает отслеживание изменения контролируемого параметра на некотором будущем дискретном интервале времени. В данной статье MPC управляет конденсатором с тиристорным управлением. Результаты показали, что MPC улучшает устойчивость контролируемых параметров при переходных процессах сложных гибридных систем с нелинейностями и ограничениями.

Полученный в [18] опыт оценивается авторами как основа для развития системы АРЧМ в будущем. Как было сказано выше, одной из приоритетных задач развития АРЧМ является управление мощностью, передаваемой через ВПТ с использованием АРЧМ. Технология передачи электроэнергии на постоянном токе реализована на основе FACTS устройств, например, таких как СТАТКОМ.

Статья [19] посвящена исследованию регулирования частоты в энергосистемах, соединенных через линию постоянного тока, а в статье [20] рассматривается управление ВПТ от системы АРЧМ для обеспечения более эффективного регулирования частоты и обменных перетоков.

Результаты, полученные в ходе опытов, показывают, что в энергосистемах, связанных через вставку, номинальное значение частоты и заданные значения перетоков достигаются за меньшее время по сравнению с опытом без HVDC линии, а перерегулирование уменьшается. Результаты исследований, приведенные во второй статье показывают, что управление ВПТ от системы АРЧМ способствует увеличению объема передаваемой мощности.

С учетом выше сказанного можно определить наиболее приоритетные направления развития системы АРЧМ, одним из которых является увеличение качества регулирования частоты и перетоков активной мощности. Одним из ярких примеров такого направления является исследование новых методов в теории автоматического регулирования. Например, большое внимание уделяется методу управлению по прогнозным моделям (Model Predictive Control), который представляет собой новый подход к решению задач по регулированию контролируемых параметров технологических процессов. Одним из преимуществ данного метода является использование математической модели объекта регулирования, что позволяет предсказывать изменения контролируемых параметров. Помимо этого, алгоритм MPC позволяет решать оптимизационную задачу, путем минимизации целевой функции, параметрами которой являются контролируемые переменные объекта регулирования. Данное обстоятельство позволяет выполнять оптимальный расчет управляющих воздействий, что дает возможность учитывать экономическую эффективность при регулировании.

Зарубежные исследования также доказывают эффективность использования системы АРЧМ совместно с современными технологиями

электроэнергетики, например, такими как FACTS и HVDC. Результатами исследований является повышение качества регулирования частоты и перетоков путем снижения перерегулирования контролируемого параметра и времени его установления, а также увеличение пределов передаваемой мощности в энергосистемах, соединенных через ВПТ.

Таким образом, на основе проанализированной литературы можно классифицировать направления развития системы АРЧМ по следующим группам:

1. Повышение качества регулирования за счет использования новых методов теории автоматического управления;
2. Использование современных технологий, таких как FACTS и HVDC, совместно с АРЧМ.

В рамках данной исследовательской работы будет уделено внимание первому направлению развития системы АРЧМ на основе применения метода управления по прогнозным моделям для решения задач автоматического регулирования частоты.

1.5. Цель и задачи исследования

Целью данной работы является исследование возможности применения и программная реализация регулятора на основе метода управления по прогнозным моделями для автоматического вторичного регулирования частоты.

Исследование новых методов регулирования требует последовательного решения целого ряда задач с постепенным увеличением сложности представления объекта управления и самой задачи регулирования. Современные энергосистемы представляют собой энергообъединения, характеризующиеся большим количеством внешних и внутренних связей, оборудования и возможных режимов работы. Поэтому разработка и

исследование нового регулятора на модели реальной энергосистемы крайне затруднена. Вместе с тем, возможно выделить режимы работы отдельных энергосистем, для которых задача вторичного регулирования упрощается до задачи АРЧ, однако сохраняется актуальность рассмотренных выше проблем.

В качестве примера можно привести Кольскую энергосистему, которая относится к операционной зоне Северо-Запада. Кольская энергосистема связана с ОЭС Северо-Запада через воздушную линию Княжегубская – Лоухи, и при выделении на изолированную работу частота в энергообъединении не может поддерживаться регулятором ЦКС АРЧМ. Данное обстоятельство требует наличия в Кольской энергосистеме собственной системы ЦС АРЧМ. В периоды изолированной работы Кольской энергосистемы от ЕЭС, а также после аварийного выделения на изолированную работу Кольской энергосистемы от ЕЭС, с использованием ЦС АРЧМ осуществляется автоматическое вторичное регулирование частоты – вводится в работу регулятор в режиме АРЧ [21].

Согласно стандарту «Оперативно-диспетчерское управление в электроэнергетике. Регулирование частоты и потоков активной мощности в ЕЭС и изолированно работающих энергосистемах России» [22] обязанностью Системного оператора (субъекта оперативно диспетчерского управления в изолированно работающих энергосистемах) является:

- определение актуальных функций вторичного регулирования режима подведомственной операционной зоны;
- формирование перечня электростанций вторичного регулирования, оценка возможности размещения на них вторичных резервов, достаточных для выполнения всей совокупности актуальных функций вторичного регулирования режима;
- выделение областей регулирования и областей ограничения, формулирование для каждой из них перечней функций вторичного регулирования и придаваемых для их выполнения электростанций вторичного регулирования, распределение ответственности между

диспетчерскими центрами всех уровней за выполнение каждой из актуальных функций.

ЦС АРЧМ изолированно работающих энергосистем должны выполнять следующие функции:

- Регулирование частоты в изолированной зоне;
- Автоматическое ограничение перетоков по транзитным связям своей области регулирования.

В изолированно работающих энергосистемах предъявляются следующие требования к качеству регулирования частоты:

- частота должна находиться в пределах $50 \pm 0,2$ Гц не менее 95% времени суток, не выходя за предельно допустимый уровень $50 \pm 0,4$ Гц;
- средняя частота за любые 0,5 часа суток должна поддерживаться в пределах $50 \pm 0,05$ Гц;
- на выделенных для вторичного регулирования электростанциях должен постоянно поддерживаться необходимый вторичный резерв.

С точки зрения инерционности технологического оборудования требования к регулированию частоты в изолированных энергосистемах аналогичны требованиям для ЕЭС и приведены в пункте 1.2.

Таким образом, в данной работе предлагается рассмотреть применение МРС для реализации АРЧ регулятора на примере изолированной системы. Дополнительно, для того, чтобы масштабировать полученные результаты исследований, в работе будет выполнена сравнительная оценка эффективности применения АРЧ регулятора на базе МРС и I регуляторов для микроэнергосистемы и крупного энергообъединения.

Обобщая выше сказанное можно сформулировать следующие основные задачи исследования:

1. Анализ архитектуры и задач системы Автоматического вторичного регулирования частоты и активной мощности;

2. Изучение принципа управления по прогнозным моделям Model Predictive Control;
3. Моделирование процесса регулирования частоты с использованием традиционного I регулятора и MPC регулятора;
4. Разработка прототипа MPC регулятора, предназначенного для автоматического вторичного регулирования частоты.
5. Тестирование разработанного программного модуля.

Глава 2. Управление по прогнозным моделям (Model Predictive control)

Управление по прогнозным моделям (Model Predictive Control) - один из современных методов в теории автоматического управления сложными технологическими процессами. Применение метода управления по прогнозным моделям может обеспечить потенциал для дальнейшего развития системы АРЧМ.

Основным достоинством MPC подхода является его принцип действия, основанный на прогнозировании поведения регулируемого параметра объекта регулирования на некотором будущем дискретном временном интервале с возможностью корректировки расчетов на каждом последующем шаге дискретизации. Это обеспечивается за счет формирования отрицательной обратной связи. Отмеченные свойства MPC позволяют управлять многомерными объектами со сложной структурой, например, такими как турбоагрегат, а также оптимизировать процессы с учетом ограничений на входные и выходные переменные путем минимизации целевой функции, которая определяется параметрами объекта регулирования в режиме реального времени.

2.2. Принцип регулирования на основе метода управления по прогнозным моделям

Рассмотрим принцип регулирования на основе метода управления по прогнозным моделям согласно рисунку 3.

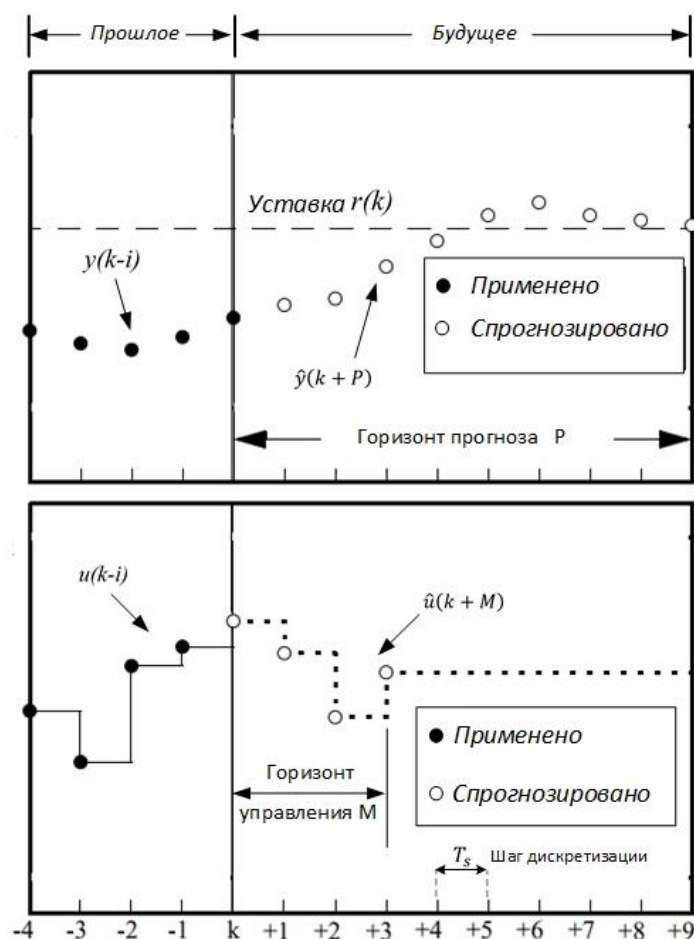


Рисунок 3 – принцип регулирования на основе метода управления по прогнозным моделям

Где:

P – горизонт прогноза, длина интервала прогнозирования на заданное количество шагов в будущем;

M – горизонт управления, длина последовательности рассчитываемых управляющих воздействий;

$r(k)$ – уставка контролируемого параметра;

$y(k-i)$ – значения контролируемого параметра в прошлом;

$u(k-i)$ – значения управляющего воздействия в прошлом;

$\hat{y}(k+P)$ – прогнозные значения контролируемого параметра;

$\hat{u}(k+M)$ – прогнозные значения управляющего воздействия;

T_s – шаг дискретизации времени измерений.

1. В момент k с объекта регулирования на вход МРС регулятора поступает измеряемое значение контролируемого параметра $y(k)$ и задается его уставка контролируемого $r(k)$;

2. На основе линеаризованной математической модели объекта управления вычисляется стратегия управления для горизонта прогнозирования $[k, k + P]$ с заданным шагом дискретизации по времени T_s , а именно рассчитываются прогнозные значения контролируемого параметра $\hat{y}(k + P)$ и прогнозные значения управляющего воздействия $\hat{u}(k + M)$;

3. После выполнения расчета прогнозных траекторий $\hat{y}(k + P)$ и $\hat{u}(k + M)$, с выхода регулятора выдается сигнал управления для первого шага $u(k)$ траектории управления, который приводит к изменению контролируемого параметра – перемещению из точки $y(k)$ в точку $y(k+1)$;

4. Новое значение $y(k+1)$ поступает на вход регулятора и снова выполняется расчет траектории со смещением на шаг $k+1$.

И так далее горизонт прогноза продолжает смещаться вперед с шагом дискретизации T_s .

2.2. Формирование математической модели объекта регулирования

Особенность регулирования на основе метода управления по прогнозным моделям заключается в использовании математической модели объекта регулирования. В общем случае состояние регулируемого объекта можно описать нелинейными дифференциальными уравнениями в пространстве состояния:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (1)$$

$$y = Cx \quad (2)$$

Где $x \in R^n$ – вектор состояния, элементы которого характеризуют состояния системы в дискретные моменты времени; $y \in R^m$ – вектор выходных измеряемых переменных управляемого объекта; $u \in R^p$ – вектор значений управляющего воздействия; A, B, C – матрицы состояния соответствующей размерности, определяемые параметрами системы.

Для удобства расчетов следует воспользоваться дискретной формой записи уравнений (1) и (2):

$$x_{k+1} = Ax_k + B_u u_k \quad (3)$$

$$y_k = Cx_k \quad (4)$$

Для того чтобы рассчитать управляющее воздействие регулятору необходимо знать текущее состояние системы в момент k , которое описывается уравнениями (3) и (4), а также уставку, к которой необходимо привести контролируемый параметр. Используя математическую модель объекта, MPC регулятор рассчитывает прогнозное значение контролируемого параметра и прогнозное значение управляющего воздействия на каждом шаге дискретизации.

Рассмотрим принцип формирования математической модели на примере объекта регулирования – энергоблока, состоящего из паровой турбины и генератора:

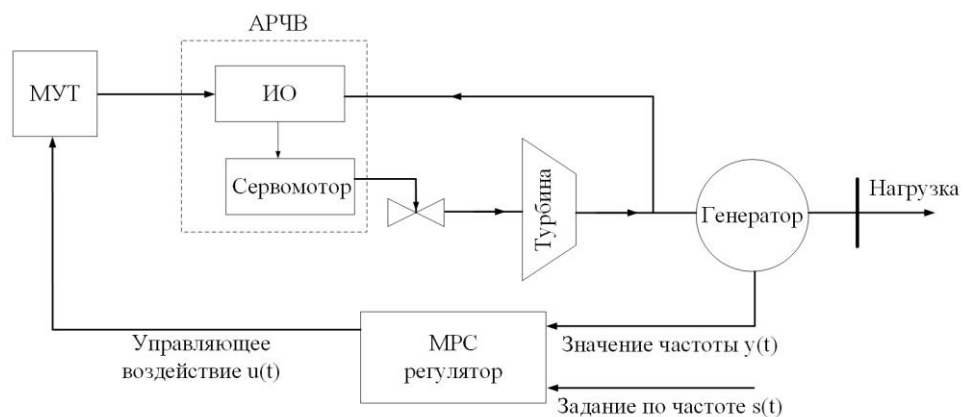


Рисунок 4 – Структурная схема объекта регулирования

Где

МУТ – механизм управления турбиной

ИО – Измерительный орган

Многомерные динамические модели в пространстве состояний реализуются во многих случаях линеаризацией исходных дифференциальных уравнений, описывающих процессы в многомерных нелинейных управляемых объектах. При моделировании используется упрощенная линеаризованная модель объекта регулирования, которая представлена блоками передаточных функций такого основного оборудования, как генератор, турбина, сервомотор:

Таблица 2.1: Передаточные функции оборудования

Объект	Передаточная функция	Пояснения
Генератор	$W_G = \frac{1}{T_j p + 1}$	T_j — постоянная механической инерции генератора
Турбина	$W_T = \frac{1}{T_T p + 1}$	T_T — постоянная инерции турбины
Сервомотор	$W_{CM} = \frac{1}{T_{CM} p + 1}$	T_{CM} — постоянная времени гидравлического двигателя сервомотора

Структурная схема объекта регулирования и его математическая модель в составе МРС регулятора представлены на рисунке:

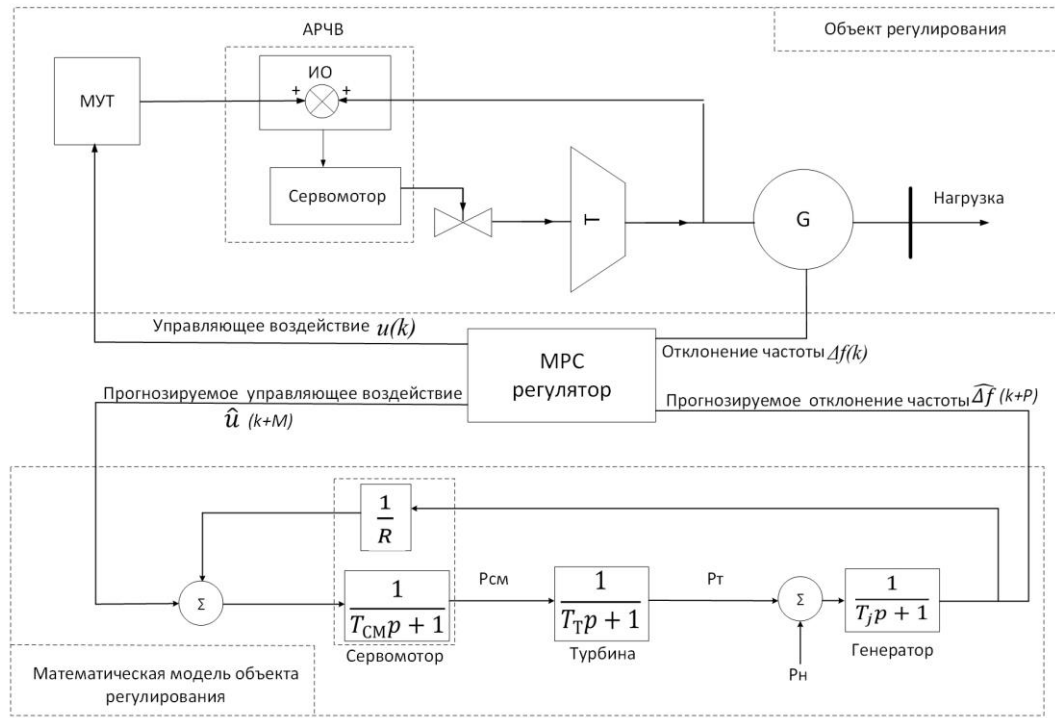


Рисунок 5 – Структурная схема регулируемого объекта

Где

Δf – сигнал отклонения частоты

P_T – значение мощности турбины

ΔP_{CM} – значение управляющего воздействия, выдаваемого сервомотором

R – статизм регулятора скорости вращения

Для составления дифференциальных уравнений, описывающих математическую модель объекта регулирования необходимо воспользоваться уравнением движения агрегата турбина-генератор, замещающего группу синхронно работающих генераторов. Уравнение движения ротора агрегата турбина-генератор может быть получено на основе уравнения вращающих моментов, действующих на вал агрегата:

$$M_{\text{э}} + M_j = M_T \quad (5)$$

где $M_{\text{э}}$ – электромагнитный момент генератора, M_j – момент инерционных сил, M_T – момент турбины.

Представим уравнение (8) в виде:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_T - M_{\Sigma} \quad (6)$$

где ω – угловая частота вращения вала агрегата, J – момент инерции вращающихся масс.

Перейдем к относительным единицам, приняв за базисные номинальные значения частоты $\omega_{\text{НОМ}}$ и момента $M_{\text{НОМ}}$. Тогда

$$J \frac{\omega_{\text{НОМ}}}{M_{\text{НОМ}}} \frac{d\omega_*}{dt} = M_{T*} - M_{\Sigma*} \quad (7)$$

Величина $J \frac{\omega_{\text{НОМ}}}{M_{\text{НОМ}}} = T_j$ – является механической постоянной времени вращающихся масс. Таким образом имеем

$$T_j \frac{d\omega_*}{dt} = M_{T*} - M_{\Sigma*} \quad (8)$$

Момент и активная мощность связаны между собой отношением $P = \omega M$. Так как в реальных режимах, в том числе и переходных, отклонения частоты от номинального значения невелики, то при рассмотрении принципиальных вопросов вполне допустима приближенная замена моментов в относительных единицах соответствующими мощностями также в относительных единицах

$$T_j \frac{d\omega_*}{dt} = P_{T*} - P_{\Sigma*} \quad (9)$$

Уравнение (9) является основой исследования переходных процессов по частоте и активной мощности. [12]

Составим уравнения пространства состояний моделируемого объекта согласно (1) и (2). Для этого необходимо выразить изменения сигнала отклонения частоты, сигнала с выхода турбины и сигнала с выхода сервомотора. Это можно сделать, используя передаточные функции для каждого оборудования согласно структурной схеме рисунка 5:

Генератор:

$$W_{\Gamma} = \frac{s_{\text{ВЫХ}}}{s_{\text{ВХ}}} = \frac{\Delta f}{\Delta P_{\Gamma}} = \frac{1}{T_j p + 1} \quad (10)$$

Где $s_{\text{ВЫХ}}$ – выходной сигнал из блока передаточной функции генератора,
 $s_{\text{ВХ}}$ – входной сигнал в блок передаточной функции генератора.

Преобразуем и выразим $\Delta f \cdot p$ из (10):

$$\Delta f \cdot p = \frac{\Delta P_{\Gamma}}{T_j} - \frac{\Delta f}{T_j} \quad (11)$$

Уравнение (11) описывает процесс изменения частоты на некотором интервале времени регулирования.

Сервомотор:

$$W_{\text{CM}} = \frac{s_{\text{ВЫХ}}}{s_{\text{ВХ}}} = \frac{\Delta P_{\text{CM}}}{\Delta P_{\text{mpc}} - \frac{\Delta f}{R}} = \frac{1}{\Delta T_{\text{CM}} p + 1} \quad (12)$$

Преобразуем и выразим $\Delta P_{\text{CM}} \cdot p$ из (15):

$$\Delta P_{\text{CM}} \cdot p = \frac{\Delta P_{\text{mpc}}}{T_{\text{CM}}} - \frac{\Delta f}{RT_{\text{CM}}} - \frac{\Delta P_{\text{CM}}}{T_{\text{CM}}} \quad (13)$$

Турбина:

$$W_{\Gamma} = \frac{s_{\text{ВЫХ}}}{s_{\text{ВХ}}} = \frac{\Delta P_{\Gamma}}{\Delta P_{\text{CM}}} = \frac{1}{1 + T_{\Gamma} p} \quad (14)$$

Преобразуем и выразим $\Delta P_{\Gamma} \cdot p$ из (17):

$$\Delta P_{\Gamma} \cdot p = \frac{\Delta P_{\text{CM}}}{T_{\Gamma}} - \frac{\Delta P_{\Gamma}}{T_{\Gamma}} \quad (15)$$

Система уравнений 11, 13 и 15 описывает математическую модель объекта регулирования в дифференциальном виде. В виде дискретных уравнений пространства состояний система уравнений примет вид:

$$\begin{bmatrix} \Delta f(k+1) \\ \Delta P_{\Gamma}(k+1) \\ \Delta P_{\text{CM}}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_j} & \frac{1}{T_j} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{\Gamma}} & \frac{1}{T_{\text{CM}}} \\ -\frac{1}{RT_{\text{CM}}} & 0 & -\frac{1}{T_{\text{CM}}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta f(k) \\ \Delta P_{\Gamma}(k) \\ \Delta P_{\text{CM}}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_{\text{CM}}} \end{bmatrix} \cdot [\Delta P_{\text{mpc}}(k)]$$

$$y(k) = [1 \quad 0 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} \Delta f(k) \\ \Delta P_T(k) \\ \Delta P_{CM}(k) \end{bmatrix}$$

Где

$$\text{Вектор состояния объекта регулирования} - x(k) = \begin{bmatrix} \Delta f(k) \\ \Delta P_T(k) \\ \Delta P_{CM}(k) \end{bmatrix}$$

$$\text{Вектор управляющего воздействия} - u(k) = [\Delta P_{mpc}(k)]$$

$$\text{Вектор выходных значений системы} - y(k)$$

Матрицы состояния системы, управляющего воздействия, возмущающего воздействия и выходных величин имеют вид:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_j} & \frac{1}{T_j} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_T} & \frac{1}{T_{CM}} \\ -\frac{1}{RT_{CM}} & 0 & -\frac{1}{T_{CM}} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_{CM}} \end{bmatrix} \quad C = [1 \quad 0 \quad 0] \quad (18)$$

Таким образом, составлена система дифференциальных уравнений в пространстве состояний, описывающих исследуемый объект регулирования.

2.3. Алгоритм расчета управляющих воздействий на основе метода управления по прогнозным моделям

Алгоритм расчета управляющих воздействий основан на использовании данных о математической модели. Согласно [27] прогнозируемая траектория контролируемого параметра описывается уравнением:

$$\hat{y}(k+P) = \hat{y}_f(k+P) + S(P) \cdot \Delta \hat{u}(k) \quad (19)$$

Где

$\hat{y}_f(k+P)$ – свободный отклик объекта регулирования, то есть отклик, который был бы получен, если значение управляющего воздействия на будущем шаге дискретизации будет заменено на предыдущее значение $u(k-1)$;

$S(P)$ – отклик математической модели на единичное ступенчатое управляющее воздействие;

$\Delta\hat{u}(k)$ – приращение управляющего воздействия на шаге дискретизации.

Основная идея регулирования сводится к тому, чтобы прогнозное значение выходного сигнала равнялось уставке контролируемого параметра:

$$\hat{y}(k + P) = r(k + P) \quad (20)$$

Таким образом, используя уравнение 19 для расчета управляющего воздействия требуется:

1. Выполнить расчет математической модели объекта регулирования согласно пункту 2.2;

2. Используя данные о математической модели, а также известные значения управляющего воздействия и контролируемого параметра на прошлом шаге дискретизации, определить свободный отклик объекта регулирования на горизонте прогноза:

$$\hat{y}_f(k + P) = A \cdot y(k - 1) + B \cdot u(k - 1) \quad (21)$$

где A и B – числитель и знаменатель передаточной функции математической модели соответственно.

3. Рассчитать отклик математической модели на единичное ступенчатое управляющее воздействие $S(P, M)$ на горизонте прогноза P с заданным значением горизонта управления M ;

4. Рассчитать приращение управляющего воздействия $\Delta\hat{u}(k)$ на шаге дискретизации по формуле:

$$\Delta\hat{u}(k) = \frac{r(k+P) - \hat{y}_f(k+P)}{S(P, M)} \quad (22)$$

5. Зная значение управляющего воздействия на прошлом шаге, определить значение управляющего воздействия на текущем шаге:

$$u(k) = \Delta\hat{u}(k) + u(k - 1) \quad (23)$$

Значение $u(k)$ применяется для перемещения значения контролируемого параметра из точки $y(k)$ в точку $y(k+1)$. Точка $y(k+1)$ становится текущим

значением и снова выполняется расчет управляющего воздействия для следующего шага дискретизации.

2.4. Обоснование выбора среды моделирования

Для решения поставленных задач среда математического моделирования должна обеспечивать моделирование энергосистемы в режиме реального времени. Для удобства визуального восприятия и работы с моделью программный комплекс должен предоставлять возможность использования стандартных наборов блоков для имитационного моделирования электротехнических устройств. Среда моделирования также должна предоставлять возможности расчета электрических режимов, как установившихся, так и переходных.

Дополнительным критерием выбора программной среды моделирования является наличие в ней инструментов моделирования систем автоматического управления. В частности, это наличие библиотек, которые позволяют моделировать систему управления на основе метода управления по прогнозным моделям.

Наиболее эффективным инструментом моделирования с точки зрения описанных выше требований является программный комплекс MATLAB, включающий в себя необходимые для исследования библиотеки, такие как Simulink и Model Predictive Control Toolbox. MATLAB - это одновременно программный комплекс и язык программирования. Одно из его преимуществ заключается в том, что на языке MATLAB могут быть написаны программы для многократного использования. Пользователь может сам написать специализированные функции и программы, которые сохраняются в виде М-файлов.

Библиотека Simulink – это графическая среда имитационного моделирования, позволяющая при помощи блок-диаграмм в виде

направленных графов, создавать динамические модели. Интерактивная среда Simulink, позволяет использовать уже готовые библиотеки блоков для моделирования электросиловых, механических и гидравлических систем, а также применять развитый модельно-ориентированный подход при разработке систем управления, средств цифровой связи и устройств реального времени.

Model Predictive Control Toolbox - представляет собой набор инструментальных средств для исследования и проектирования алгоритмов управления в дискретных и непрерывных системах на основе предсказания динамики их поведения. Пакет в основном ориентирован на решение совокупности задач по анализу и синтезу систем управления непрерывными технологическими процессами, в которых используются математические модели объектов регулирования. Возможности данного пакета позволяют исследовать применение MPC регулятора для решения задачи автоматического регулирования частоты.

2.5. Моделирование процесса регулирования частоты

Как было указано в разделе 1.5 Главы 1, одной из главных задач исследования является анализ возможности применения метода управления по прогнозным моделям для решения задачи АРЧ в изолированных энергосистемах.

Существуют различные типы изолированно работающих энергосистем. Например, это могут быть микроэнергосистемы промышленных предприятий (энергоснабжающие самобалансирующиеся организации), которые могут работать как изолированно, так и параллельно с ЕЭС. При этом в режиме изолированной работы они должны решать задачу автоматического регулирования частоты самостоятельно. Особенностью таких энергосистем являются относительно небольшая единичная мощность генерирующих установок – от единиц до десятков МВт, как правило, генерация

представлена газотурбинными или парогазовыми установками, а также малыми значениями постоянных инерции агрегатов, что в свою очередь влияет на колебательность процесса регулирования частоты.

Другим примером изолированно работающих энергосистем могут быть крупные энергообъединения, которые в случае технологических особенностей сети и возникновения аварийных ситуаций выделяются на изолированную работу, или энергообъединения удаленных регионов, постоянно работающие изолированно от ЕЭС. Такие энергосистемы характеризуются большими значениями единичной мощности генерирующих агрегатов – от десятков до сотен МВт, обычно ТЭС с паровыми турбинами и ГЭС, а также большей инерционностью генерирующего оборудования.

Таким образом, характер процесса регулирования частоты зависит от состава генерирующего оборудования и его инерционности. В связи с этим моделирование выполняется для двух типов энергосистем. Для энергосистемы с установленной мощностью 20 МВт и для энергосистемы, значения постоянных инерции и баланс мощности которой близки к характеристикам Кольской энергосистемы.

В реальных энергосистемах выделяются конкретные электростанции для обеспечения первичного регулирования, а также электростанции для вторичного регулирования. Некоторые электростанции могут выполнять эти функции одновременно. Поэтому для оценки качества регулирования частоты с помощью MPC регулятора (вторичное регулирование не должно приводить к снижению эффективности первичного регулирования) в программном комплексе MATLAB Simulink смоделирована двухмашинная энергосистема, в которой одна эквивалентная станция обеспечивает первичное регулирование, а вторая – первичное и вторичное регулирование.

Моделирование микроэнергосистемы

Модель энергосистемы представляет собой два эквивалентных генератора, входящих в состав одной электростанции и работающих на общую нагрузку. Генераторы приводятся в движение тепловыми турбинами, модели которых

заданы моделями одноцилиндровых турбин. Первый генератор обеспечивает первичное и вторичное регулирование частоты, второй – только первичное. Параметры эквивалентных энергосистем представлены в таблицах 2.2 и 2.3:

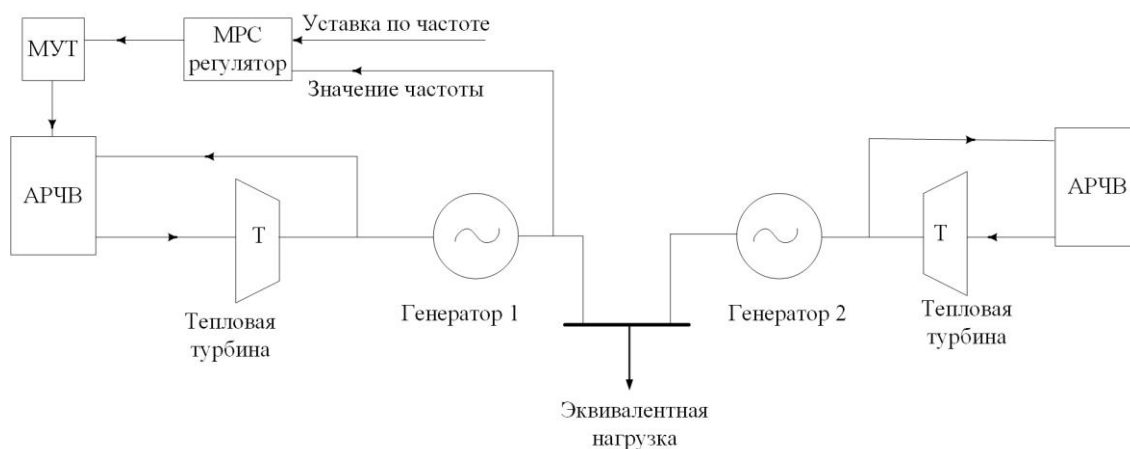


Рисунок 6 – Структурная схема микроэнергосистемы

Таблица 2.2: Параметры эквивалентной энергосистемы 1

Мощность генератора	Статизм регулятора частоты вращения	Зона нечувствительности регулятора частоты вращения	Постоянная механической инерции турбины-генератора	Постоянная инерции сервомотора
МВт	о.е.	Гц	с	с
10	0,05	0,075	4,8	0,05

Таблица 2.3: Параметры эквивалентной энергосистемы 2

Мощность генератора	Статизм регулятора частоты вращения	Зона нечувствительности регулятора частоты вращения	Постоянная механической инерции турбины-генератора	Постоянная инерции сервомотора
МВт	о.е.	Гц	с	с
10	0,05	0,075	4,8	0,05

Процесс моделирования начинается с настройки МРС регулятора. Для этого необходимо в рабочем окне Simulink подключить МРС регулятор к

математической модели объекта регулирования, которая задана передаточными функциями основного оборудования, параметры которого приведены в таблице 2.2. Соответствующие сигналы подключаются к входам и выходам регулятора:

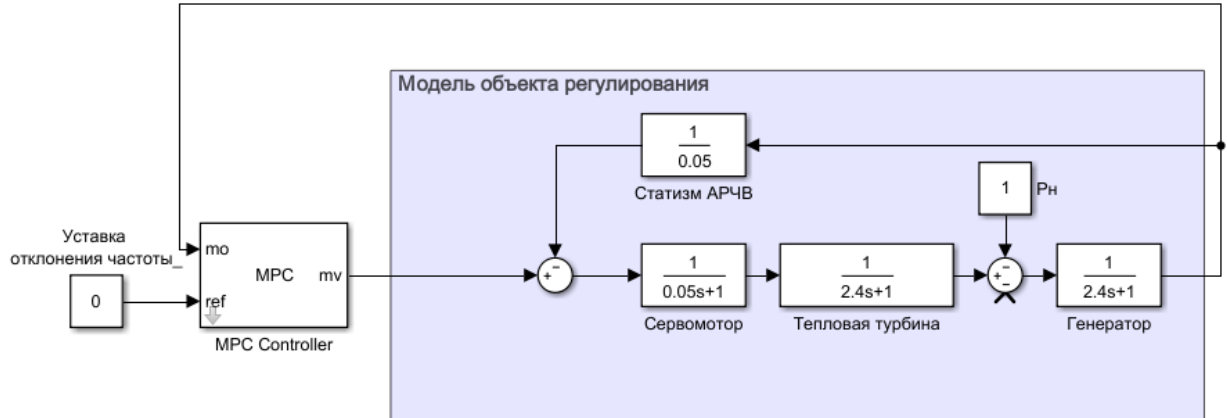


Рисунок 7 – Настройка MPC регулятора на математической модели объекта регулирования

- mo (measurement object) – измеряемый параметр. На данный вход поступает разность сигналов номинального и текущего значений частоты;
- ref (reference trajectory) – уставка измеряемого параметра (50 Гц);
- mv (manipulated variable) – управляемая переменная (управляющее воздействие).

Непосредственная настройка выполняется в диалоговом окне MPC Designer, принадлежащему инструменту Model Predictive Control Toolbox библиотеки Simulink программного комплекса MATLAB:

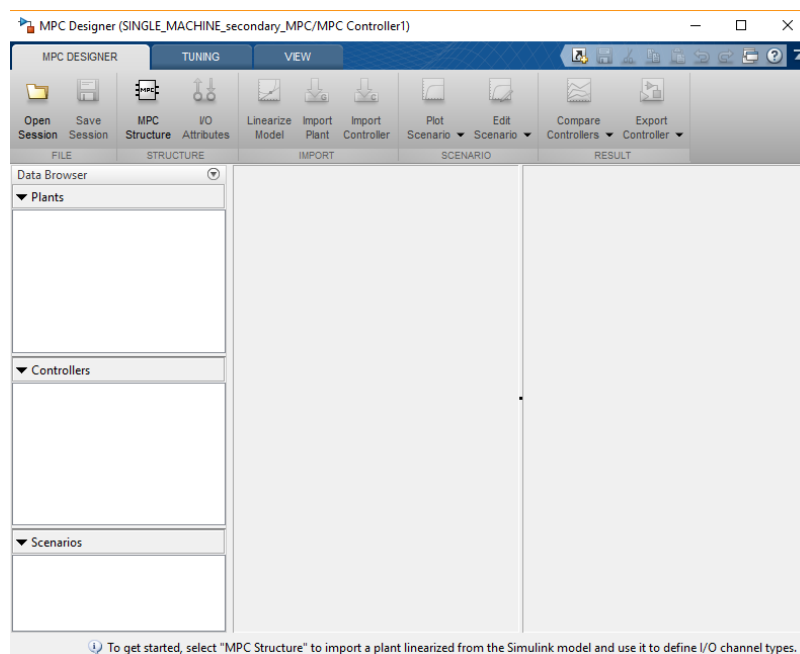


Рисунок 8 – Редактор настройки MPC регулятора

Первым этапом необходимо определить входные и выходные сигналы MPC регулятора. Для этого вызывается окно «MPC Structure»:

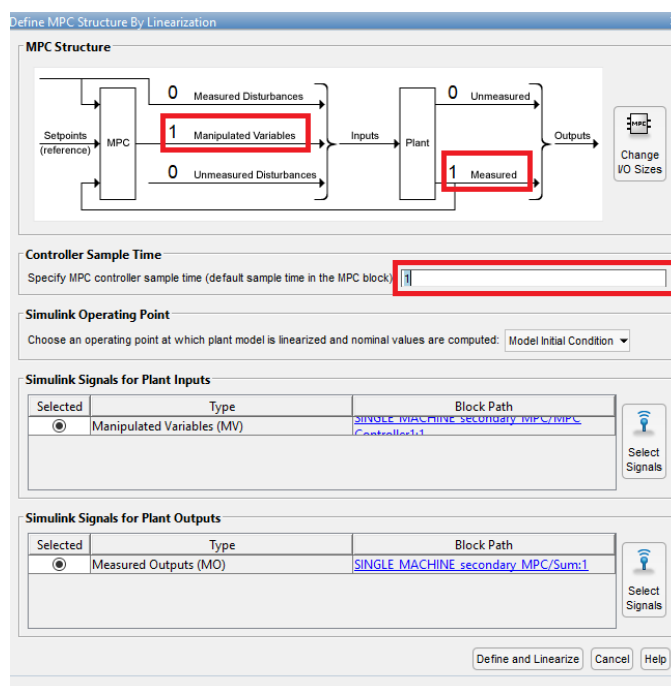


Рисунок 9 – Редактор подключения сигналов к MPC регулятору

В этом окне показаны входные и выходные сигналы регулятора, его взаимодействие с объектом управления, а также шаг дискретизации поступающей информации об измеряемом параметре. При нажатии кнопки

«Define and Linearize» выполняется формирование линейризованной математической модели объекта регулирования.

Настройка сценария работы регулятора:

Channel	Name	Nominal	Signal	Size	Time	Period
r(1)	Ref of Ген...	0	Step	1	1	

Рисунок 10 – Редактор настройки сценария работы MPC регулятора

В данном окне настраивается отклик математической модели на единичное ступенчатое воздействие. В нашем случае регулятор настраивается на промежутке времени в 900 секунд, так как согласно [6] значение частоты должно быть восстановлено до заданного значения за время не более 15 минут. Согласно нормам участия энергоблоков ТЭС в АВРЧМ, максимальная величина вторичной мощности может достигать $\pm 5\%$ от $P_{\text{ном}}$, а скорость изменения мощности генерирующего оборудования не более $1\% P_{\text{ном}}/\text{мин}$. В MATLAB мощность агрегата выражается в относительных единицах и составляет 1 о.е. Таким образом, управляющее воздействие не может превышать значений $\pm 0,05$ о.е., а скорость его изменения – 0,01 о.е.

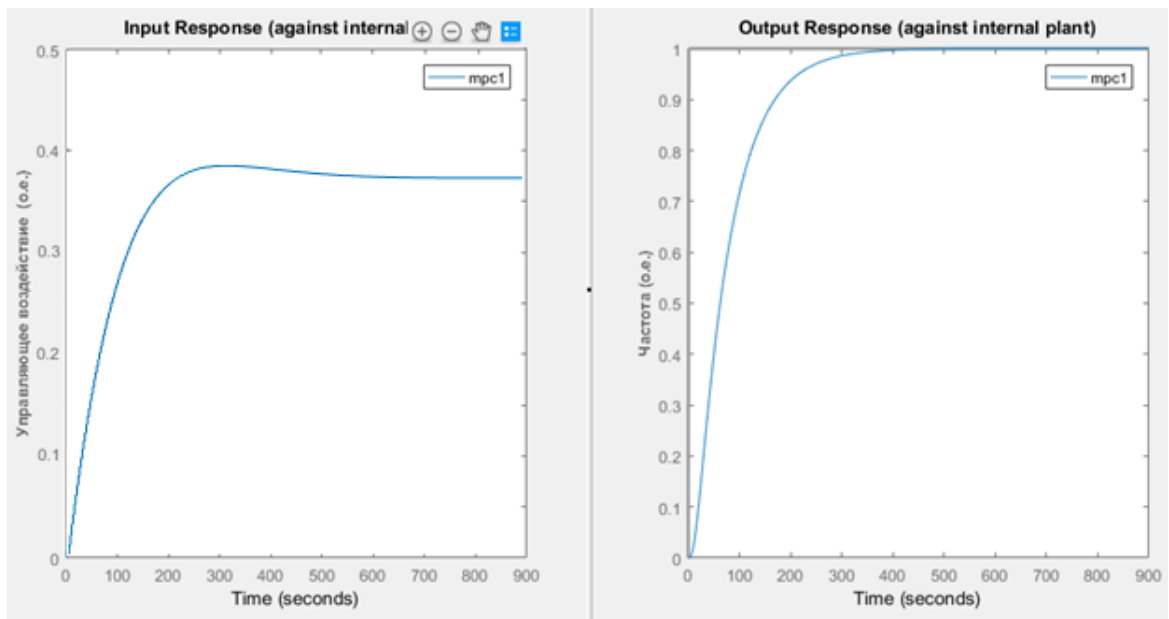


Рисунок 11 – сигнал управляемой переменной (слева) и сигнал измеряемой выходной величины(справа)

Настройка параметров прогнозирования:

Рисунок 12 – Настройка параметров прогнозирования

- Sample time (T_s) – время дискретизации
- Prediction horizon (P) – горизонт прогноза
- Control horizon (M) – горизонт управления.

Если известно, за какой промежуток времени T необходимо достичь заданного значения выходного измеряемого сигнала (900 секунд) и известно время дискретизации T_s (1 секунда), то значение прогнозируемого горизонта P определяется уравнением $P \approx T/T_s$. Длительность горизонта управления M рекомендуется брать много меньшим, чем горизонт прогнозирования $M \ll P$, так как меньшее значение M обеспечивает более стабильное и устойчивое регулирование.

Для оценки эффективности MPC регулятора также выполняется моделирование с использованием интегрального регулятора. Согласно [4]

коэффициент интегральной составляющей в ЦКС/ЦС АРЧМ для режима АРЧ равен 0,01.

Исходя из норм участия оборудования ТЭС в АВРЧМ, для исследования эффективности регулирования выполняется увеличение/уменьшение вторичной мощности агрегата на загрузку/разгрузку при возникновении возмущения. На рисунках 14, 15, 17, 18 представлены результаты регулирования частоты с помощью МРС и I регуляторов при возникновении возмущения 0,5 МВт на загрузку и разгрузку агрегатов соответственно. Для оценки необходимого вторичного задания также приведены результаты регулирования частоты при использовании только первичного регулирования:

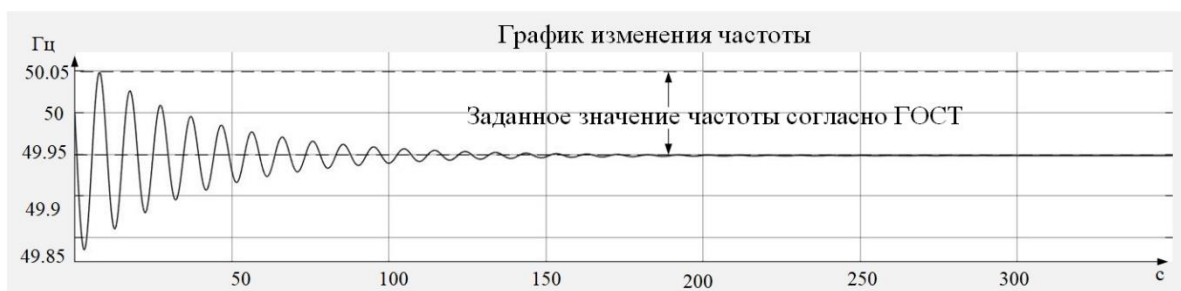


Рисунок 13 – Результаты моделирования регулирования частоты при использовании первичного регулирования на загрузку генераторов

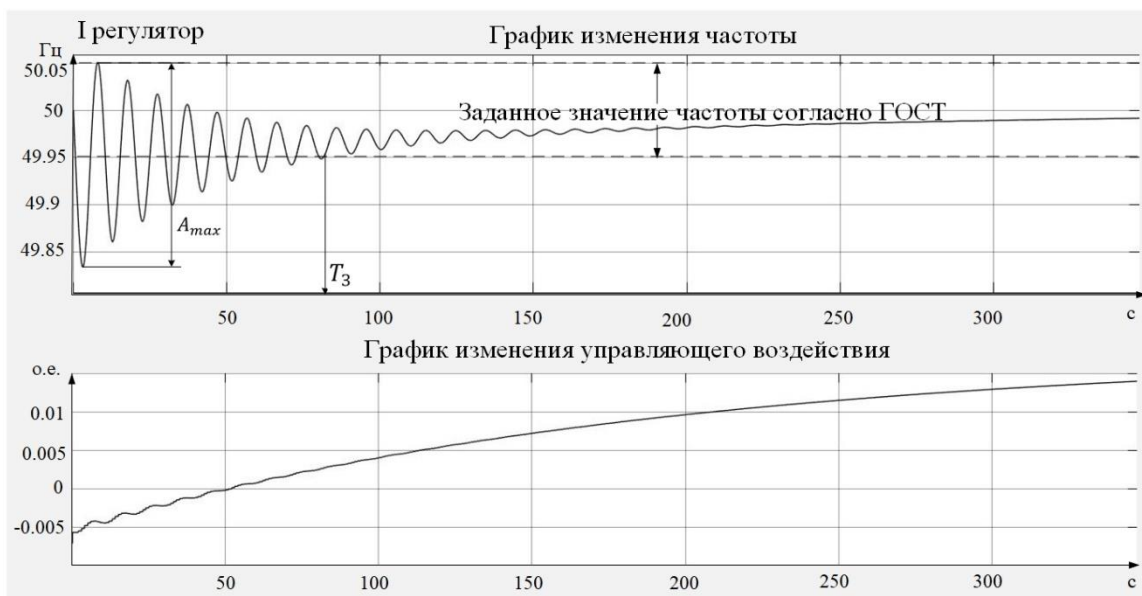


Рисунок 14 – Результаты моделирования при использовании I регулятора на загрузку генераторов

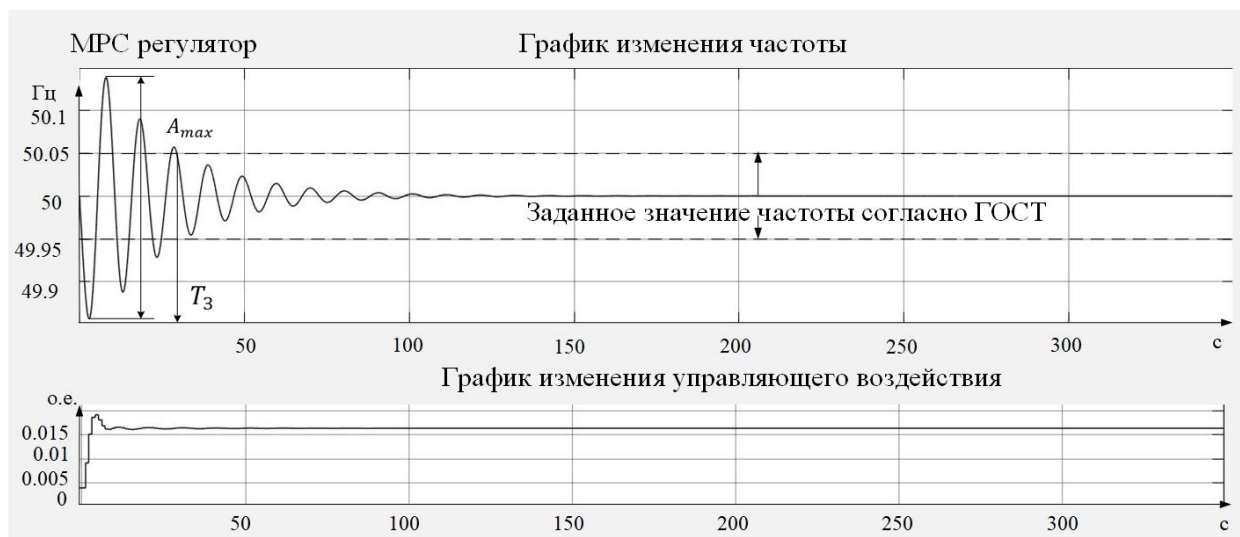


Рисунок 15 – Результаты моделирования при использовании MPC регулятора на загрузку генераторов

Полученные результаты показывают, что действия первичного регулирования недостаточно для восстановления частоты до заданного значения, поскольку присутствует статическая ошибка регулирования на границе 0,05 Гц.

Анализ результатов регулирования частоты при загрузке генераторов при использовании I и MPC регуляторов:

Максимальный разброс значений отклонения частоты A_{max} в обе стороны от номинального значения в случае использования I регулятора составил 0,3 Гц, в случае использования MPC – 0,31 Гц. MPC регулятор приводит значение частоты к заданному диапазону значений за время T_3 , равное 40 секунд с момента возмущения. При использовании I регулятора это время составило 80 секунд.

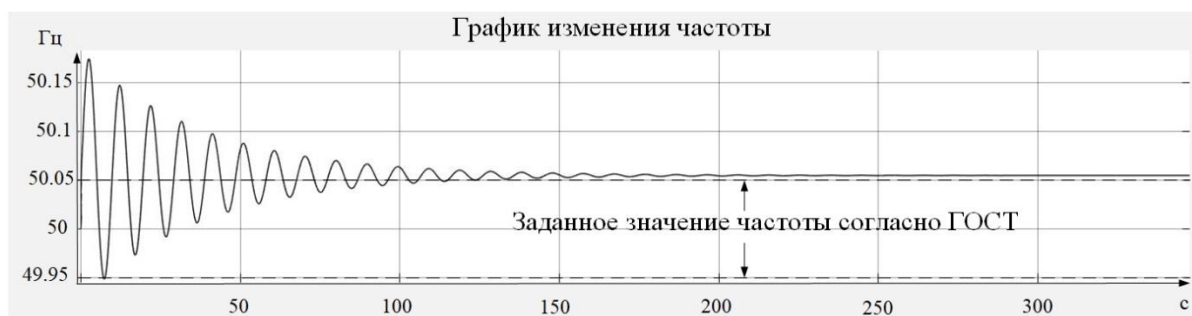


Рисунок 16 – Результаты моделирования регулирования частоты при использовании первичного регулирования на разгрузку генераторов

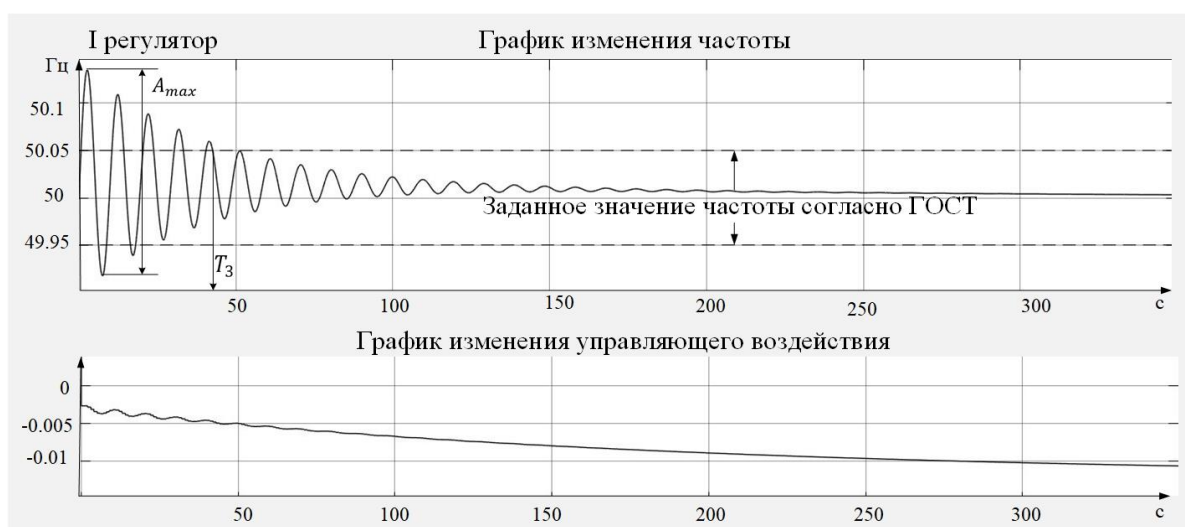


Рисунок 17 – Результаты моделирования при использовании I регулятора на разгрузку генераторов

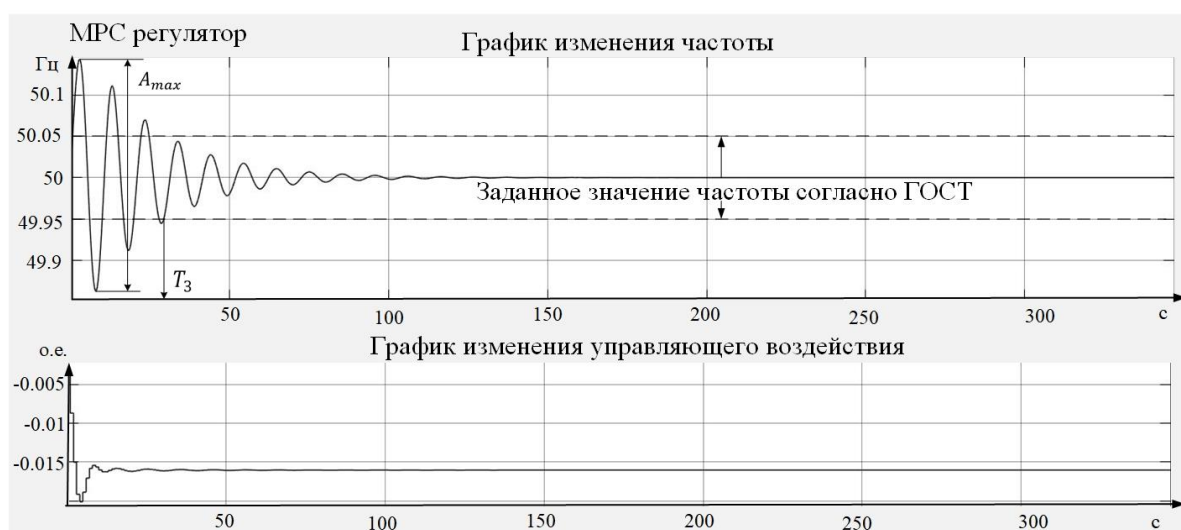


Рисунок 18 – Результаты моделирования при использовании MPC регулятора на разгрузку генераторов

Исследование регулирования частоты при опыте возникновения возмущения на разгрузку генераторов показало, что первичное регулирование отрабатывает со статической ошибкой со значением 0,06 Гц.

Анализ результатов регулирования частоты при разгрузке генераторов при использовании I и MPC регуляторов:

В случае использования I регулятора максимальный разброс значений отклонения частоты A_{max} в обе стороны от номинального значения составляет 0,27 Гц, а значение частоты приводится к допустимому диапазону отклонений за время 55 секунд. В случае использования MPC регулятора максимальный разброс значений отклонения частоты равен 0,28 Гц. Время T_3 , за которое регулятор приводит частоту к допустимому диапазону значений – 30 секунд.

Результаты исследований сравнительной эффективности MPC и I регуляторов в микроэнергосистеме позволили установить, что MPC регулятор позволяет уменьшить время установления контролируемого параметра, при этом величина перерегулирования сопоставима со случаем использования I регулятора. Стоит отметить, что процесс регулирования в микроэнергосистеме сопровождается интенсивными колебаниями частоты. Это связано с тем, что результирующая передаточная функция объекта регулирования представляет собой колебательное звено с различными значениями постоянных инерций, что обеспечивает колебательный процесс при регулировании частоты. При этом MPC регулятор обеспечивает большую робастность относительно интегрального регулятора, позволяя демпфировать колебания.

Моделирование энергообъединения большой мощности

Модель представляет собой упрощенное описание Кольской энергосистемы. Согласно [30] установленная мощность Кольской энергосистемы составляет 3633 МВт, из них 2040 МВт вырабатывается на ТЭС, а 1593 МВт – на ГЭС. Все гидроэлектростанции заведены под АРЧМ,

поэтому модель представляет собой двухмашинную энергосистему, в которой один эквивалентный генератор замещает тепловые электростанции, обеспечивая первичное регулирование, а второй – гидроэлектростанции, обеспечивая первичное и вторичное регулирование. Тепловая турбина эквивалентной ТЭС представлена моделью одноцилиндровой турбины. Структурная схема, иллюстрирующая модель представлена на рисунке 19. Полная схема модели энергосистемы в MATLAB представлена в Приложении 1. Параметры эквивалентной энергосистемы представлены в таблицах 2.4 и 2.5:

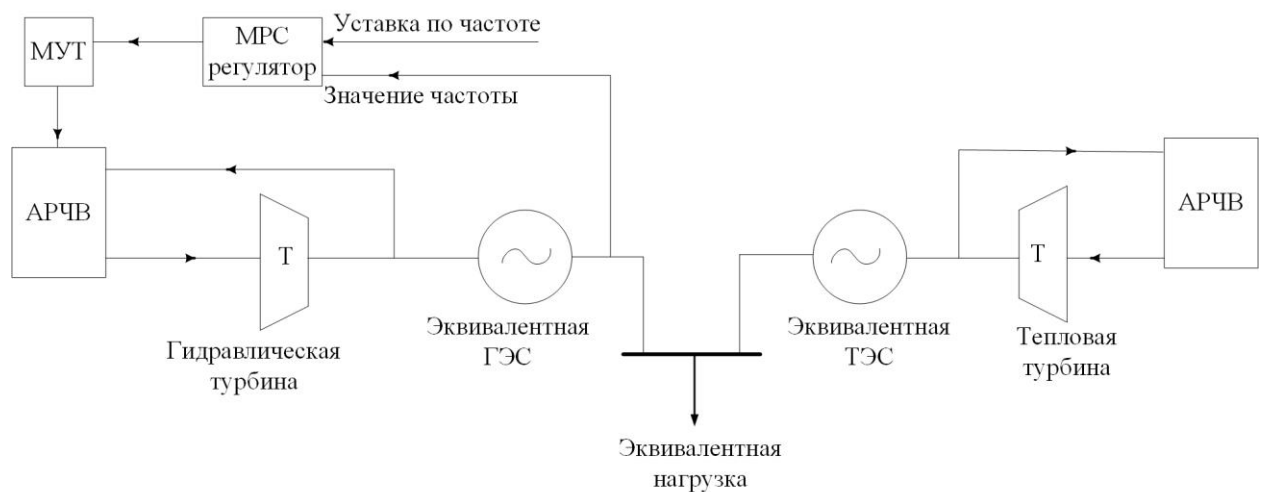


Рисунок 19 – схема объекта регулирования в MATLAB Simulink

Таблица 2.4: Параметры эквивалентной ТЭС

Мощность генератора	Статизм регулятора частоты вращения	Зона нечувствительности регулятора частоты вращения	Постоянная механической инерции турбины-генератора	Постоянная инерции сервомотора
МВт	о.е.	Гц	с	с
2000	0,05	0,075	70	0,05

Таблица 2.5: Параметры эквивалентной ГЭС

Мощность генератора	Статизм регулятора частоты вращения	Зона нечувствительности регулятора частоты вращения	Постоянная механической инерции турбины-генератора	Постоянная времени водоводов	Открытие направляющего аппарата в исходном режиме	Постоянная инерции сервомотора
МВт	о.е.	Гц	с	с	о.е.	с
1600	0,05	0,075	71	2	0,8	6

Настройка МРС регулятора выполняется по тому же принципу, как и в случае регулирования частоты в микроэнергосистеме.

На рисунках 21 и 22 представлены результаты регулирования частоты с помощью МРС и I регуляторов при возникновении возмущения величиной 100 МВт – аварийном отключении двух энергоблоков (50 МВт каждый) Серебрянской ГЭС-16. Для оценки необходимой величины вторичного задания также приведены результаты регулирования частоты с использованием только первичного регулирования:



Рисунок 20 – Результаты моделирования при использовании первичного регулирования на загрузку генераторов

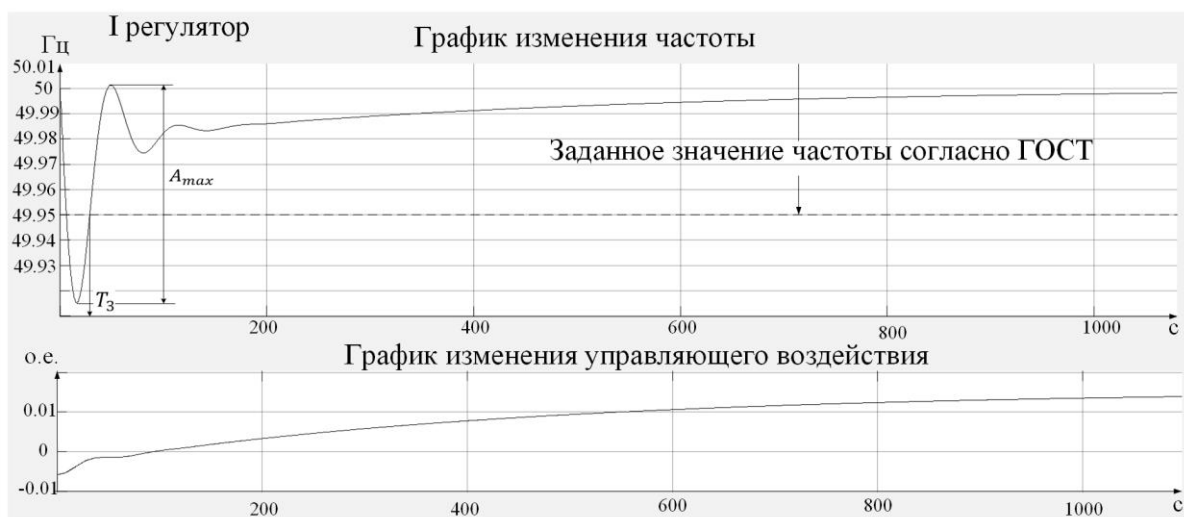


Рисунок 21 – Результаты моделирования при использовании I регулятора на загрузку генераторов

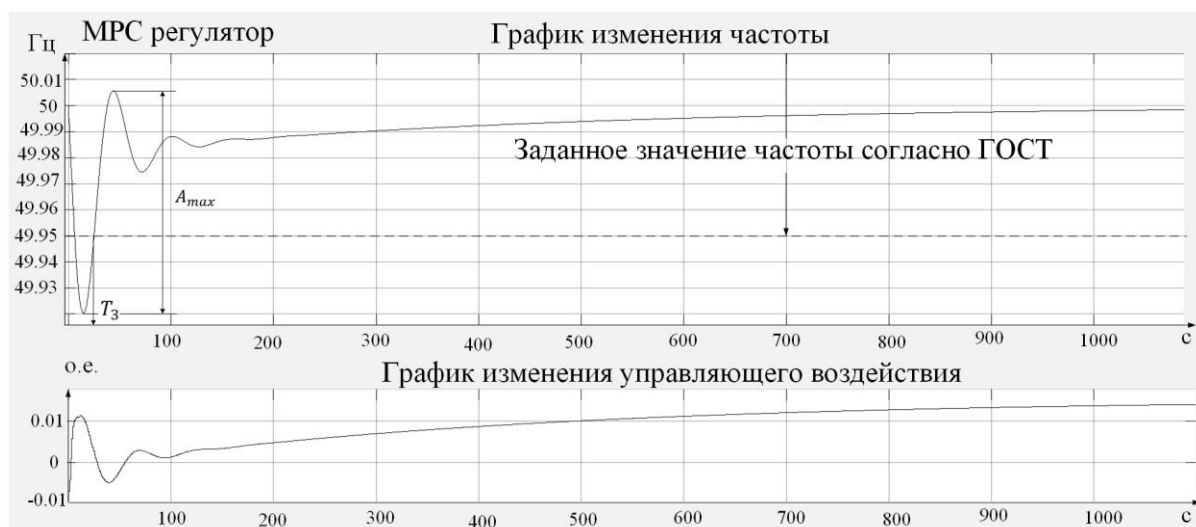


Рисунок 22 – Результаты моделирования при использовании MPC регулятора на загрузку генераторов

Результаты моделирования первичного регулирования показали, что статическая ошибка регулирования составляет 0,7 Гц.

Анализ результатов регулирования частоты при использовании I и MPC регуляторов:

Максимальный разброс значений отклонения частоты A_{max} в обе стороны от номинального значения практически одинаковый и составляет порядка 0,08 Гц при использовании разных типов регуляторов. Поскольку

энергосистема характеризуется высоким значением эквивалентной постоянной инерции генерирующего оборудования (порядка 140 секунд), то процесс регулирования не сопровождается интенсивными колебаниями частоты. При этом регуляторы приводят частоту к заданному значению за одинаковое время T_3 , которое составляет 40 секунд с момента возмущения.

Стоит отметить преимущество MPC регулятора по сравнению с I регулятором с точки зрения эффективности настройки. При настройке интегрального регулятора (задании постоянной интегрирования) параметры энергосистемы в явном виде не учитываются, поэтому зачастую коэффициент интегральной составляющей задается эмпирически и после апробации подбирается наилучшее значение. Функционал MPC регулятора обеспечивает более простую настройку параметров регулятора, так как параметры математической модели напрямую определяются параметрами объекта регулирования, а длина горизонта прогноза и горизонта управления определяются в зависимости от времени, за которое контролируемый параметр должен принять заданное значение.

Глава 3. Программная реализация и тестирование MPC регулятора

Программное решение, представляющее собой EMS приложение, предназначенное для автоматического регулирования частоты на основе метода управления по прогнозным моделям (далее регулятор), разрабатывается с использованием языков программирования MATLAB и C#.

Поскольку алгоритм расчета управляющих воздействий на основе метода управления по прогнозным моделям включает сложные математические функции, программная реализация которых достаточно трудоемка, то на этапе разработки прототипа регулятора применяется следующий подход. Программная реализация алгоритма регулятора выполняется в среде MATLAB с использованием одноименного языка программирования MATLAB. Выбор в качестве среды разработки MATLAB определяется наличием встроенных библиотек, содержащих готовый набор необходимых функций. Однако реализация самого EMS приложения на базе MATLAB не целесообразна в связи с отсутствием в имеющейся сборке инструментов для разработки графического интерфейса и высокими требованиями самого MATLAB к вычислительным ресурсам. Поэтому программное описание алгоритма, выполненное в MATLAB, компилируется в библиотеку dll формата для дальнейшей разработки прототипа регулятора, включая его графический интерфейс, на платформе .NETFramework.

Для тестирования разработанного прототипа регулятора выбран метод тестирования в замкнутом контуре (Software in the Loop Testing) [55]. Данный метод заключается в тестировании разработанного программного обеспечения в среде моделирования, которая позволяет эмулировать реальный технологический процесс и связанный с этим технологическим процессом информационный обмен. В качестве среды моделирования объекта управления в реальном времени выбран гибридный моделирующий комплекс [31]. Информационный обмен между регулятором и моделью

энергосистемы выполнен через базу данных реального времени (БДРВ) СК-2007. Для обеспечения взаимодействия регулятора с ОИК используется компонент доступа к данным (КДД), который реализован как библиотека в виде файла OIKDAC.dll. Функциональная схема тестирования регулятора представлена на рисунке 23:



Рисунок 23 – Функциональная схема тестирования регулятора в замкнутом контуре (Software in the loop)

Далее приведено подробное описание каждого из этапов разработки прототипа регулятора и настройки схемы для его тестирования.

3.1. Программная реализация алгоритма расчета управляющих воздействий

Алгоритм задается в виде функции с входными и выходными параметрами. Функция в MATLAB создается приведенным ниже выражением:

function [перечисление выходных переменных] = *название функции* [перечисление входных переменных]

В виде кода это выглядит следующим образом:

```
function [uu] = MPCFunc(Ts, Tj, Tt, Tsm, P, M, setpoint, freq)
```

К входным параметрам относятся:

- T_s – время дискретизации
- T_j – эквивалентная постоянная механической инерции агрегата турбина-генератор
- T_t – постоянная инерции турбины
- T_{sm} – постоянная инерции гидравлического двигателя сервомотора
- M – горизонт управления
- P – горизонт прогноза
- $setpoint$ – уставка значения частоты
- $freq$ – текущее значение частоты

К выходным:

- u_i – значение управляющего воздействия

Структурно алгоритм расчета управляющих воздействий для программной реализации можно представить в виде блок схемы:



Рисунок 24 –блок схема алгоритма расчета управляющих воздействий

Согласно пункту 2.3 алгоритм расчета управляющих воздействий на основе метода управления по прогнозным моделям включает в себя следующую последовательность действий:

1. Расчет математической модели объекта регулирования;

Согласно подпункту 2.2 математическая модель объекта регулирования описывается уравнениями пространства состояний в виде матриц системы векторов (21):

$$\left. \begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -(1/T_j) & 1/T_j & 0 & 0 & 1/T_t & 1/T_{sm} \\ 0 & 1/T_t & 1/T_{sm} & -(1/R \cdot T_{cm}) & 0 & -(1/T_{sm}) \end{bmatrix}; \\ B &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/T_{sm} \end{bmatrix}; \\ C &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \\ D &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Далее матрицы-вектора уравнений пространства состояния задаются переменной *plant*, которая является объектом класса LTI библиотеки Control System Toolbox.

```
plant = ss(A,B,C,D);
plant = c2d(plant,Ts);
```

Дальнейшие вычисления требуют представления математической модели в виде передаточной функции:

```
plant = tf(plant);
```

где

функция *ss* – формирует модель непрерывной системы управления в явной форме Коши;

функция *c2d* – формирует дискретную модель системы по заданной модели непрерывной системы и заданному интервалу дискретности *Ts*;

функция *tf* – выполняет преобразование математической модели, заданной в виде уравнений пространства состояний, в передаточную функцию.

2. Расчет свободного отклика объекта регулирования на горизонте прогноза, используя данные математической модели, а также известные значения управляющего воздействия и контролируемого параметра на предыдущем шаге дискретизации.

Свободный отклик объекта регулирования на горизонте прогноза рассчитывается по (21) в цикле и содержит значения в переменной *ymfree(kk)*:

```
for kk=1:max(P)
    ymfree(kk) =denm(2:ndnm+1)*yfpast+numm(2:nnumm+1)*ufpast;
    yfpast=[ymfree(kk);yfpast(1:length(yfpast)-1)];
    ufpast = [ufpast(1);ufpast(1:length(ufpast)-1)];
end
```

3. Расчет отклика математической модели $S(P,M)$ на единичное ступенчатое управляющее воздействие. Выполняется с помощью встроенной функции MATLAB *step* на горизонте прогноза в цикле, значения содержатся в переменной *S*:

```
stepresp = step(model,0:Ts:max(P)*Ts);
S= zeros(length(P),M);
for j=1:length(P)
    S(j,:)= [stepresp(P(j):-1:max(P(j)-M+1,1))', zeros(1,M-P(j))];
end
```

4. Расчет приращения управляющего воздействия $\Delta \hat{u}(k)$ на шаге дискретизации:

```
dutraj = S\ (reftraj-ymfree(P)');
```

5. Определение значения управляющего воздействия на текущем шаге, с учетом значения управляющего воздействия на предыдущем шаге:

```
uu(k)= dutraj + uu(k-1)
```

Полный вариант кода алгоритма расчета управляющих воздействий на основе метода управления по прогнозным моделям представлен в Приложении Б.

Как было описано выше, алгоритм обеспечивает вычисление функции и представляет собой М-файл (алгоритмы, написанные на языке MATLAB,

автоматически сохраняются в виде М-файла). Чтобы скомпилировать М-файл в библиотеку dll формата на платформе .NETFramework необходимо воспользоваться встроенным в MATLAB приложением Library Compiler:

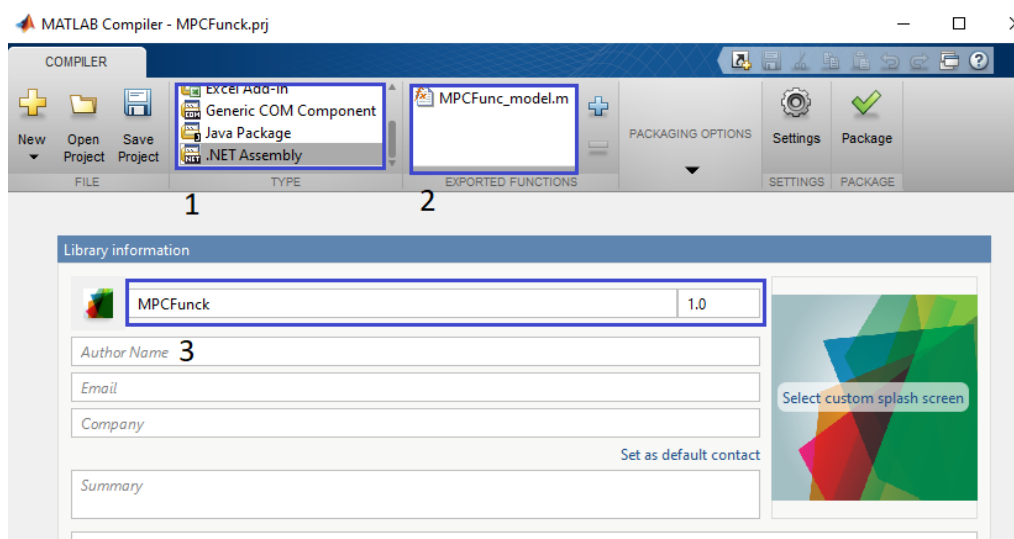


Рисунок 25 – главное окно приложения Library Compiler

В окне 1 указывается платформа, на основе которой создается библиотека. В окне 2 указывается М-файл, содержащий в себе алгоритм. В окне 3 указывается название библиотеки. При нажатии кнопки Package библиотека будет создана.

3.2. Программная реализация алгоритма и разработка графического интерфейса MPC регулятора

Разработка графического интерфейса регулятора подразумевает создание приложения с использованием интерфейса программирования приложений Windows Forms в среде разработки программного обеспечения Visual Studio. В теле программы также описывается реализация процесса подключения к СК-2007 с использованием библиотеки OIKDAC.dll. Принцип работы приложения проиллюстрирован на рисунке 26:

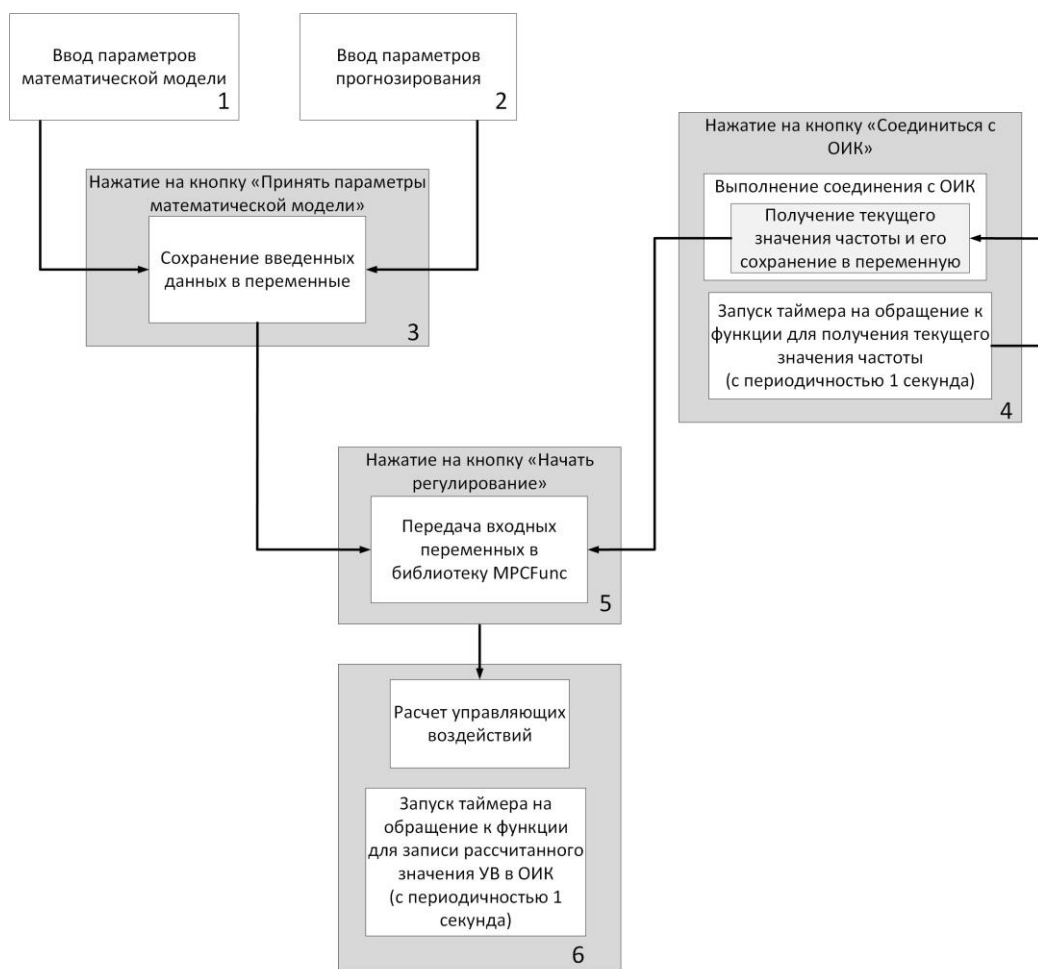


Рисунок 26 – Структурная схема, отображающая принцип работы регулятора

В первую очередь в среде Visual Studio необходимо создать проект Windows Forms:

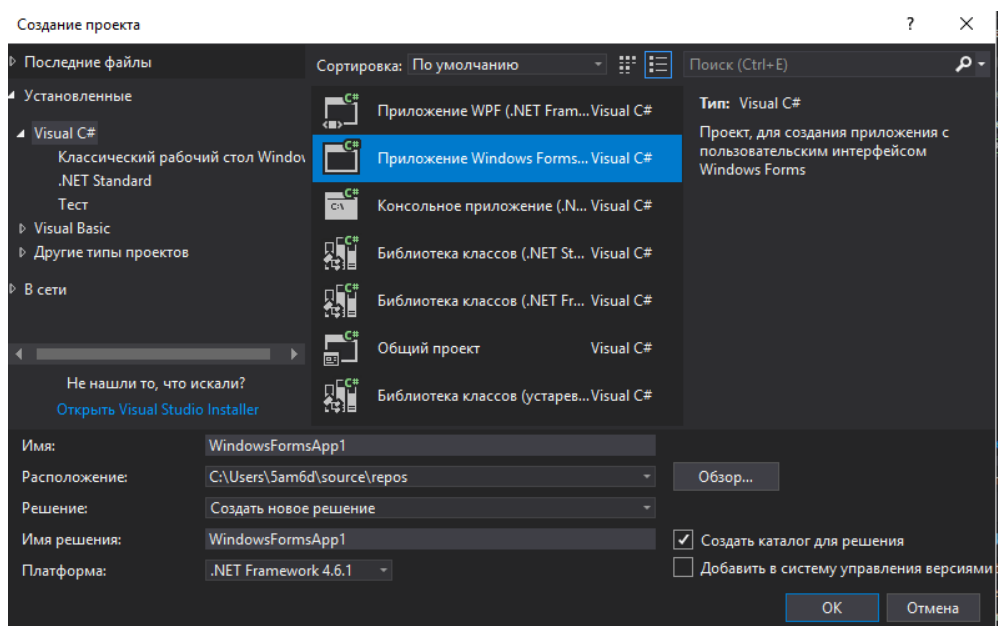


Рисунок 27 – создание проекта Windows Forms в среде Visual Studio

В обозревателе решений созданного проекта необходимо указать ссылку на библиотеку *MPCFunc* для использования описанного на языке MATLAB алгоритма в среде Visual Studio:

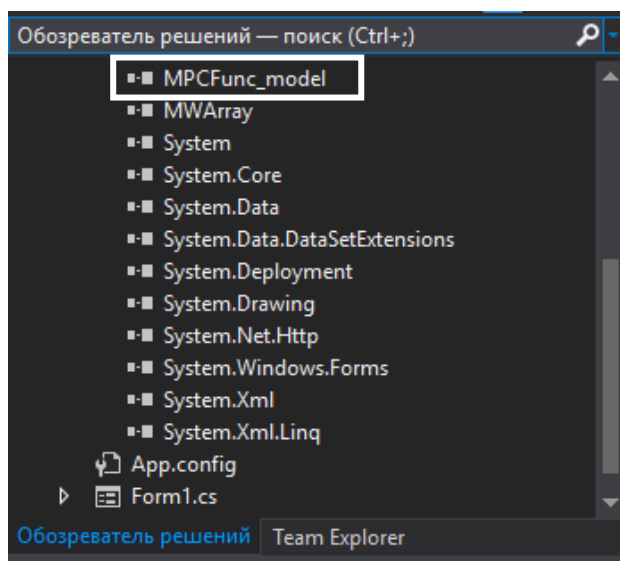


Рисунок 28 – указание ссылки на скомпилированную библиотеку

В окне конструктора Windows Forms создается интерфейс MPC регулятора с использованием стандартных инструментов таких как Text Box, Group Box, Button, Label:

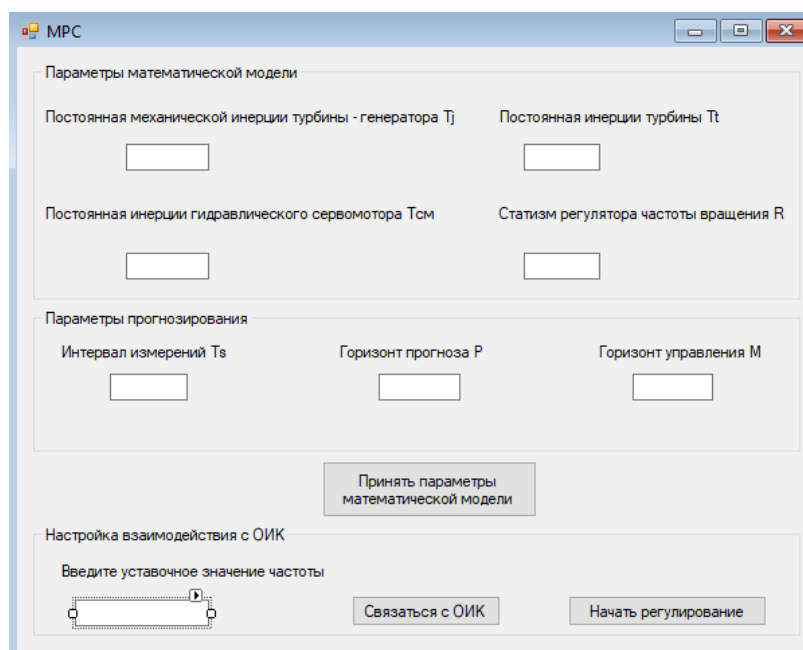


Рисунок 29 – интерфейс MPC регулятора, созданный в конструкторе Windows Forms

Функционал регулятора подразумевает введение пользователем в специальные окна – Text Box параметров математической модели объекта регулирования, а также параметров прогнозирования. При нажатии кнопки «Принять параметры математической модели» выполняется сохранение введенных параметров в специально созданные переменные.

Помимо параметров математической модели и параметров прогнозирования для расчета управляющих воздействий необходимо знать текущее значение частоты. Это реализуется с помощью использования Компонента доступа к данным (КДД). Для этого в обозревателе решений созданного проекта необходимо указать ссылку на библиотеку *OIKDAC*. Подробное описание КДД представлено в следующем подразделе:

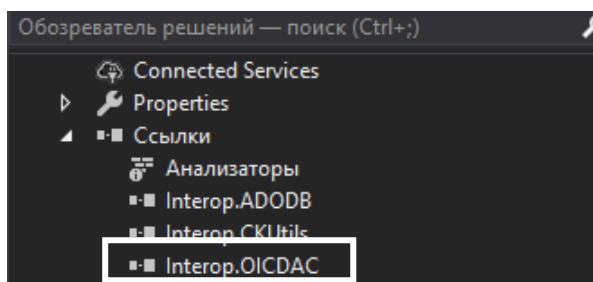


Рисунок 30 – Ссылка на библиотеку OIKDAC

Перед подключением к ОИК необходимо ввести уставку значения частоты в специальное окно Text Box. Затем при нажатии на кнопку «Связаться с ОИК» выполняется функция *OIK Connection()*:

```
private void OIK_Connection(object sender, EventArgs e)
{
    dac.Connection.Connected = false;
    dac.Connection.ConnectKind = ConnectKindEnum.ck_Default; // Соединение с ОИК

    OIRequestItem rqi = rqSubscribe.AddOIRequestItem();
    rqi.KindRefresh = KindRefreshEnum.kr_ActualData;
    rqi.DataSource = "I135"; // Значение частоты
    freq = rqi.DataSource;

    try
    {
        dac.Connection.Connected = true;
    }
    catch (Exception ex)
    {
        MessageBox.Show("Ошибка соединения с ОИК: " + ex.Message);
    }
}
```

После выполнения данной функции в специально созданной переменной *freq* сохраняется текущее значение частоты. Далее при нажатии на кнопку «Начать регулирование» вызывается функция *func.MPC()*, которая обращается к скомпилированной библиотеке *MPCFunk* с входными значениями, описанными в пункте 3.1.

```
MWNumericArray res = func.MPCFunc(Ts, Tj, Tt, Tsm, P, M, setpoint, freq);
```

Выходное значение функции – значение управляющего воздействия сохраняется в переменную *uu*, которое будет отправлено в ОИК вызовом функции *OIK Write()*:

```
private void OIK_Write(object sender, ElapsedEventArgs e)
{
    rqWrite = dac.OIRequests.Add();
    OIRequestItem rqi = rqWrite.AddOIRequestItem();
    rqi.KindRefresh = KindRefreshEnum.kr_WriteData;
    rqi.DataSource = "I143";
    rqi.DataValue = uu; // Значение, передающееся в ОИК
    rqWrite.Start();
}
```

Функции *OIK Write()* и *func.MPC()* вызываются с помощью таймера, который настроен на время дискретизации одна секунда. Таким образом, расчет управляющего воздействия и его запись в ОИК выполняется с периодичностью раз в секунду.

3.3. Обоснование выбора среды моделирования

Исследование разработанного программного обеспечения в реальных энергетических системах труднореализуемо, так как сопряжено с рисками нарушения технологического процесса неправильными действиями регулятора или любыми другими сбоями в работе тестируемого программного обеспечения. Для решения подобного рода задач и быстрого прототипирования систем управления применяется тестирование программного обеспечения в замкнутом контуре (Software in the Loop Testing) с использованием среды моделирования реального времени. В

случае тестирования разработанного прототипа регулятора к среде моделирования предъявляются следующие требования:

- Моделирование энергосистемы в режиме реального времени с возможностью включения модели в замкнутый цикл с тестируемым программным обеспечением и другими информационно-управляющими системами, в частности ОИК, с использованием стандартных протоколов передачи данных;
- Адекватность модели турбины – генератора (степень детализации) реальному объекту, а также автоматик, определяющих адекватность воспроизведения процессов при испытаниях разработанного регулятора. К устройствам такого рода, в частности, относятся автоматический регулятор возбуждения (АРВ), механизм управления турбиной (МУТ) и др.

В данной работе в качестве такого комплекса выбран всережимный моделирующий комплекс (ВМК) реального времени [31]. Данный комплекс предоставляет возможность, настройки параметров модели энергосистемы, в том числе технологической автоматики, а формирования сценариев работы ЭЭС. С точки зрения информационного взаимодействия с внешними системами ВМК имеет возможность обмена телеметрической информацией с информационно-управляющими системами через стандартные протоколы передачи данных, например, МЭК 104.

3.4. Реализация информационного обмена между МРС регулятором, СК-2007 и средой моделирования

СК-2007 является связующим звеном между регулятором и ВМК, обеспечивая информационный обмен между ними. В СК-2007 должны быть описаны два параметра – частота и задание вторичной мощности, которые поступают из/в ВМК в СК-2007 по протоколу обмена информации МЭК 60870-5-104.

Программный модуль – МРС регулятор находится на сервере, на котором установлено клиентское ПО СК-2007. Для расчета управляющего воздействия регулятор получает оперативную информацию из СК-2007 с помощью компонента доступа к данным (КДД). КДД предназначен для доступа к оперативной информации СК-2007 и реализован как библиотека в виде файла OIKDAC.dll. Принцип получения оперативной информации с помощью КДД проиллюстрирован на рисунке 31:

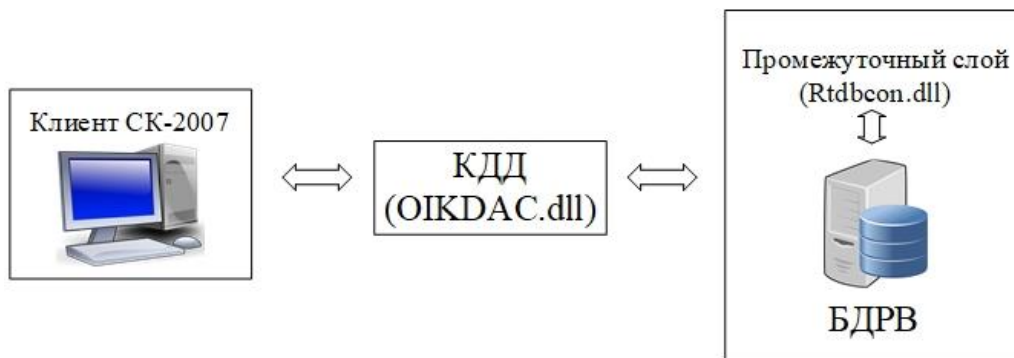


Рисунок 31 – Получение оперативной информации с помощью КДД

На основе полученного с помощью КДД значения частоты из БДРВ СК-2007 МРС регулятор рассчитывает управляющее воздействие, которое записывается в специально созданное нетелемеханизированное телеизмерение. Данное телеизмерение отправляется в ВМК по протоколу МЭК 60870-5-104 в качестве задания вторичной мощности.

Создание телеизмерений выполняется в редакторе СК-2007 «Описание телеизмерений». Создается ТИ «Частота Г-1 ВМК», в котором хранится значение частоты генератора 1 энергосистемы ВМК:

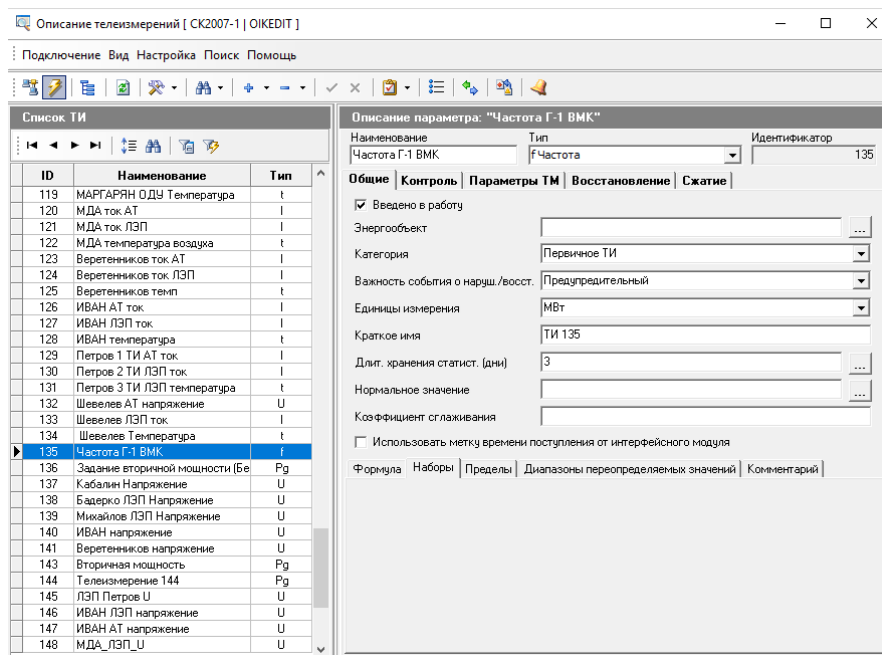


Рисунок 32 – создание ТИ для частоты

А также создается нетелемеханизированное телеизмерение, в котором будет храниться значение задания вторичной мощности, регулятором:

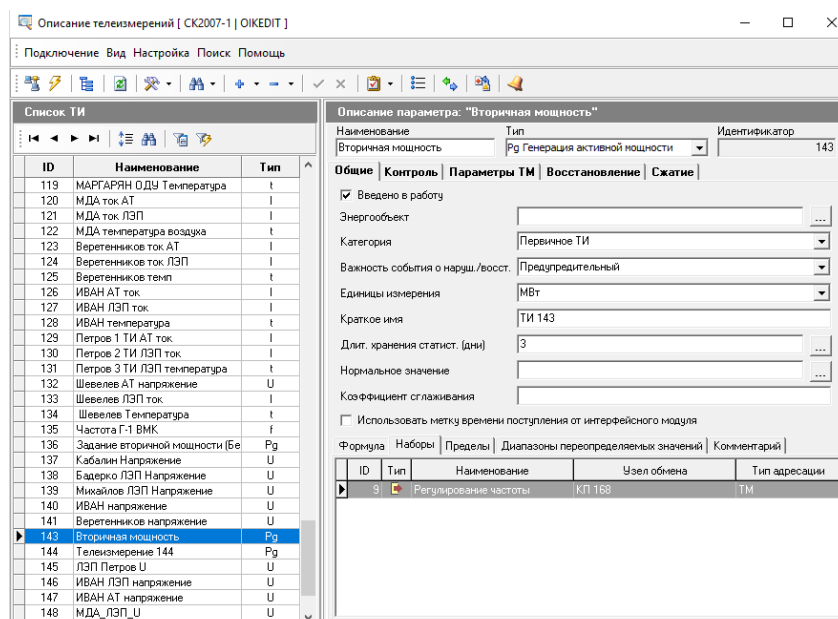


Рисунок 33 – создание ТИ для задания вторичной мощности

Прием/передача данных параметров выполняется с помощью программы конфигулятора протокола МЭК 60870-5-104:

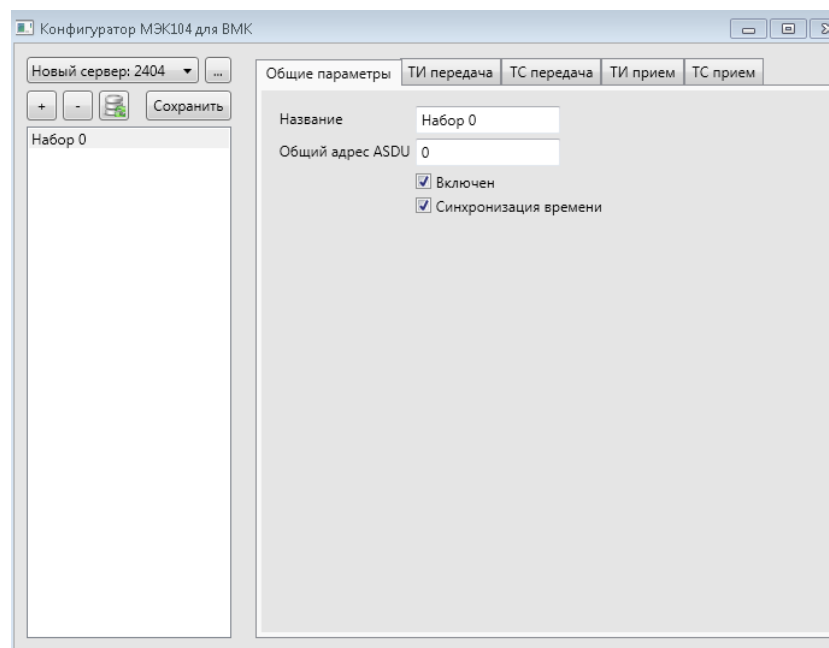


Рисунок 34 – Программа конфигуратор протокола МЭК 104

Указываются сервер, с которым устанавливается связь, название набора на прием/передачу. Общий адрес ASDU не указывается, так как в информационном обмене участвует только один набор. Затем во вкладке **ТИ передача** прописывается название необходимого параметра на передачу из ВМК и его адрес, по которому идентифицируется ТИ:

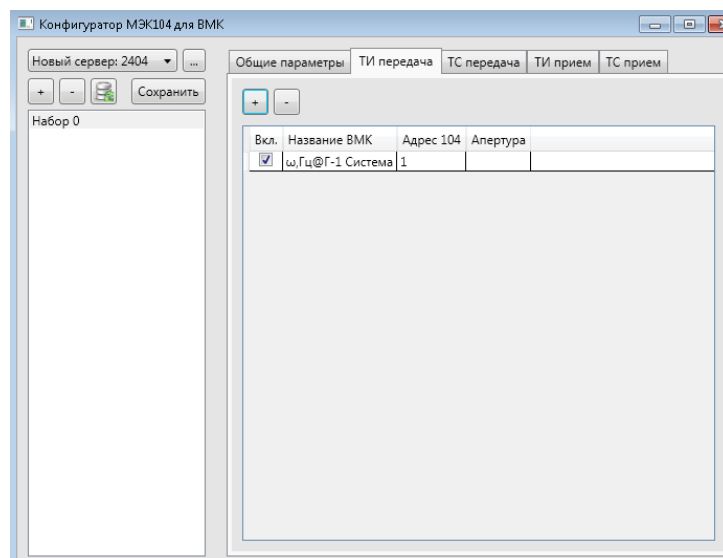


Рисунок 35 – Задание параметра на передачу из ВМК

Во вкладке **ТИ прием** прописывается название необходимого параметра на прием в ВМК и его адрес:

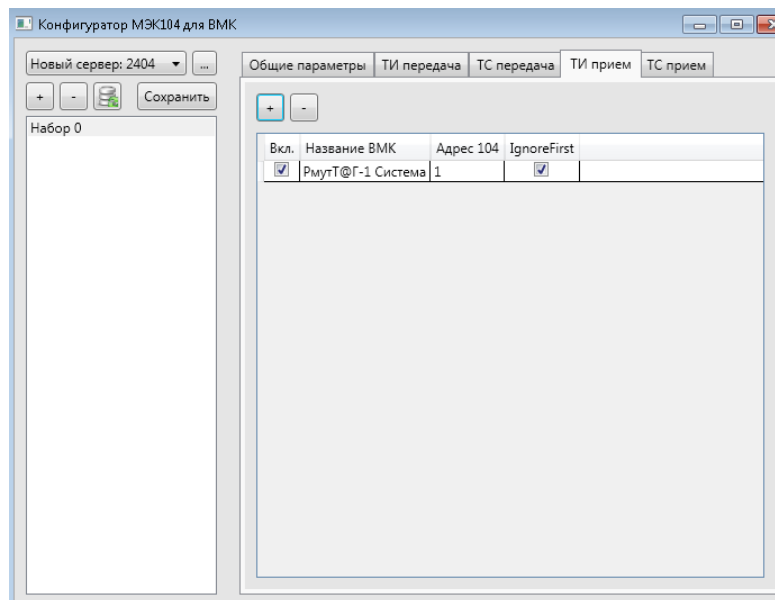


Рисунок 36 – Задание параметра на прием в ВМК

Для осуществления операций по построению и редактированию сети обмена информацией предназначен редактор «Описание сети обмена информацией», в котором создается узел обмена информацией с ВМК:

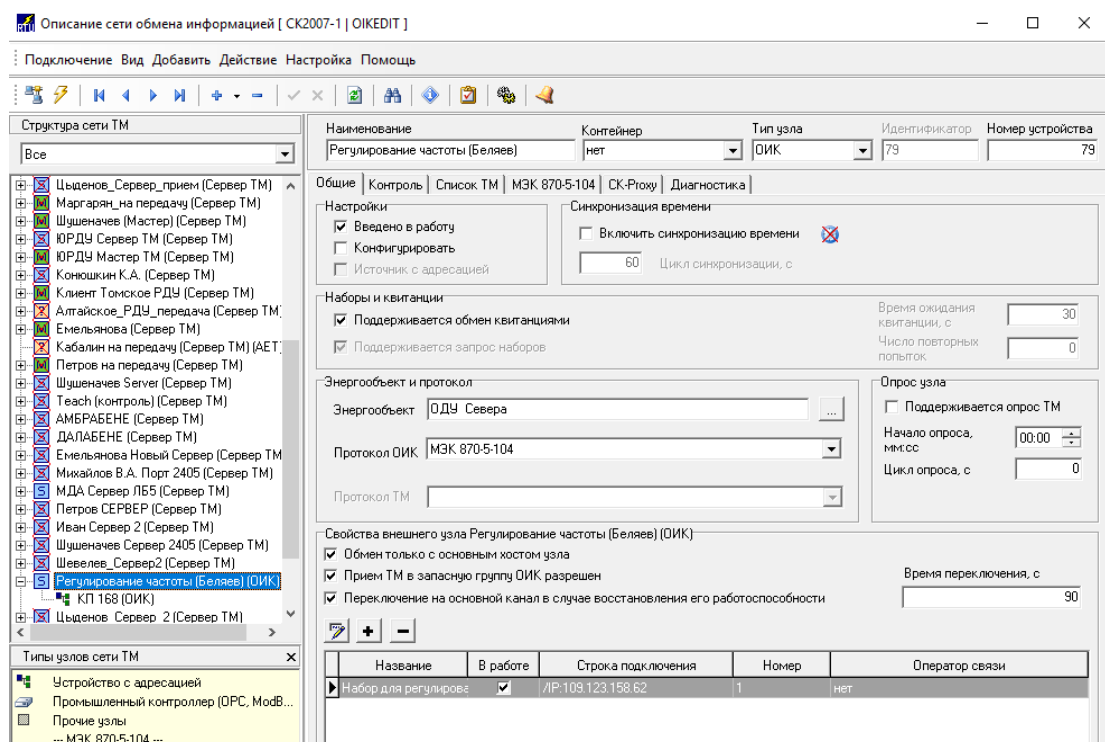


Рисунок 37 – Описание сети обмена информацией

Для описания нового узла сети обмена информацией необходимо нажать одну из кнопок **Добавить источник на тот же уровень иерархии**. После

добавления объекта «Регулирование частоты» он появится в дереве, и редактор предоставит возможность внесения параметров этого узла сети обмена информацией.

В нижней части редактора необходимо добавить узел обмена в группу и прописать IP адрес для соединения с сервером ВМК:

Редактировать группу узлов обмена

Имя: Набор для регулирования

Порядковый номер: 1

Строка подключения (каждый параметр пишется с новой строки): /IP:109.123.158.62

Оператор связи: нет

☒ В работе

OK Отмена

Рисунок 38 – Создание узла обмена

В редакторе «Описание наборов обмена информацией» создается набор на передачу в ВМК, в котором указывается нетелемаханизированное ТИ – Задание вторичной мощности:

Описание наборов обмена информацией [CK2007-1 | OIKEDIT]

Подключение Действие Настройка Помощь

Наборы обмена информацией

ИД	Тип	Наименование	Тип	Номер
1	Волокно	Томское РД	ТМ	2
2	Цыденов		ТМ	3
3	Стриков		ТМ	11
5	Шевелев		ТМ	12
6	ЮРДЦ		ТМ	13
3	Регулирование частоты		ТМ	14

Описание набора

Общие Параметры (1)

Кат.	ИД	Наименование	Тип	Группа	Адрес	Бит ретра.	и.е. нижняя	и.е. верхняя	Кванты нижняя	Кванты верхняя	Инверсия	Передача разрешена	Масштабный коэффициент
ТИ	143	Вторичная мощность	Pg	1	1				0	255	Нет	<input checked="" type="checkbox"/>	1

Рисунок 39 – Описание наборов обмена информацией

Область **Описание набора** предоставляет пользователю закладки, на которых можно посмотреть и изменить как общие свойства набора, так и перечень параметров ОИ, входящих в этот набор.

В данном случае был создан набор «Регулирование частоты», в котором содержится ТИ с идентификатором 143 и названием Вторичная мощность.

3.5. Тестирование разработанного регулятора

Схема энергосистемы ВМК задана математическими моделями такого электротехнического оборудования как:

- генераторы и их системы возбуждения с различными автоматическими регуляторами возбуждения (АРВ), а также первичные двигатели;
- первичные двигатели;
- синхронные двигатели с их системами возбуждения и АРВ и различными приводимыми механизмами;
- асинхронные двигатели с разнообразными приводимыми механизмами;
- трансформаторы и автотрансформаторы с РПН;
- линии электропередачи;
- обобщенные эквивалентные нагрузки моделируются полными всережимными математическими моделями.

Схема энергосистемы, моделируемой в ВМК представлена на рисунке 40. Установленная мощность генерирующего оборудования составляет 900 МВт и распределена между тремя электростанциями:

Таблица 3.1: Установленная мощность генерирующего оборудования

ГРЭС 1	ГРЭС 2		ТЭЦ
Г-1	Г-2	Г-3	Г-4
МВт			
400	200	100	200

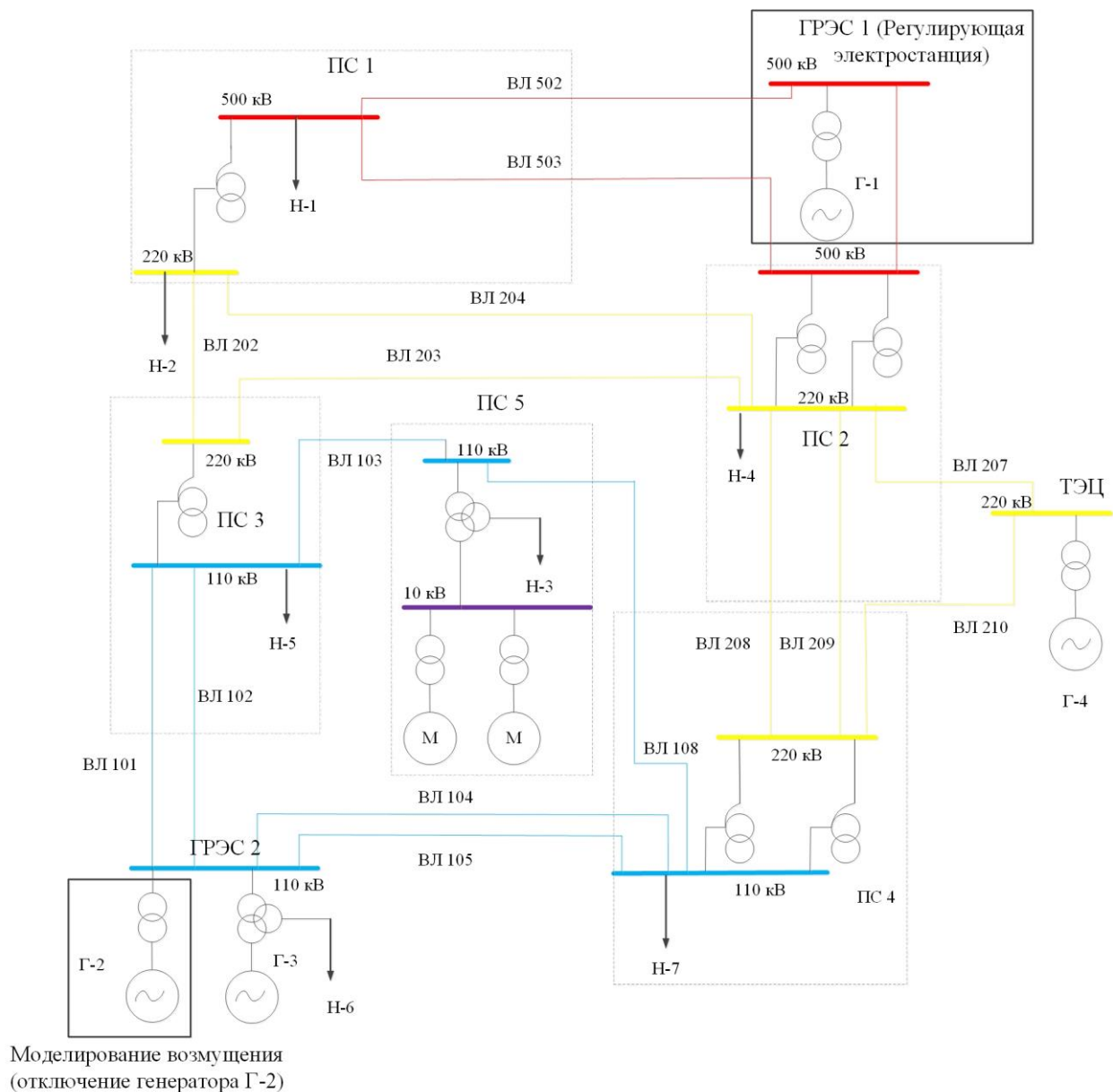


Рисунок 40 – Схема моделируемой энергосистемы

Вторичное регулирование обеспечивается с помощью энергоблока ГРЭС 1, в состав которого входит генератор Г-1, турбина и автоматический регулятор частоты вращения. Для использования МРС регулятора необходимо знать математические модели, которыми задано вышеперечисленное оборудование в ВМК.

Математическая модель синхронного генератора в ВМК представлена системой дифференциальных уравнений:

- уравнение движения ротора;

- уравнения демпферных контуров;
- уравнение потокосцепления обмотки возбуждения;
- уравнения потокосцепления в воздушном зазоре;
- уравнения результирующего потокосцепления.

Математическая модель первичного двигателя в ВМК формируется в результате воспроизведения универсальной математической модели первичного двигателя (ПД) генератора, которая получается путем анализа и синтеза полных математических моделей разнообразных паровых турбин с автоматическими системами их регулирования, например, такой как АРЧВ. Для данного исследования смоделирована паровая турбина с двумя цилиндрами. Управление турбиной обеспечивается путем суммирования сигналов от первичного регулятора и механизма управления турбиной (МУТ), который получает задание от вторичного регулятора. Помимо этого, в модели присутствует канал управления от противоаварийной автоматики (ПА). Структурная схема математической модели турбины и автоматических систем управления представлена на рисунке 41:

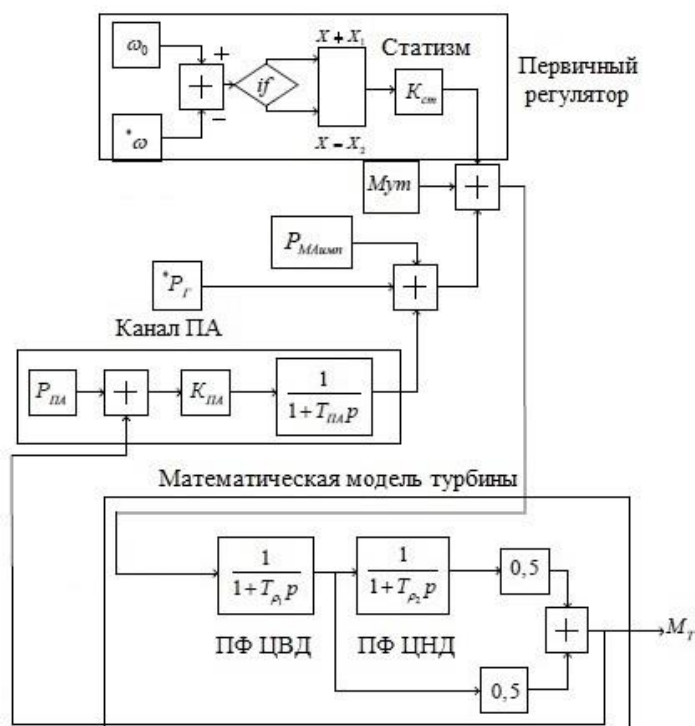


Рисунок 41 – Математическая модель турбины и автоматических систем регулирования в ВМК

Обозначения:

ω_0 – уставка по частоте;

* ω – текущее значение частоты;

$X + X_1$ – верхняя граница мертвой полосы первичного регулирования;

$X - X_2$ – нижняя граница мертвой полосы первичного регулирования;

Мут – механизм управления турбиной;

* P_{Γ} – текущая мощность генератора;

ПФ ЦВД – передаточная функция цилиндра высокого давления;

ПФ ЦНД – передаточная функция цилиндра низкого давления;

M_T – момент турбины.

Так как постоянные времени передаточных функций полной математической модели не всегда известны, а определение их значений затруднительно, то в рамках данного исследования для задания математической модели, реализованной в алгоритме МРС регулятора, использовались упрощенные передаточные функции генератора, тепловой турбины и регулятора частоты вращения.

Передаточная функция звена, замещающего генератор:

$$W_{\Gamma} = \frac{1}{T_j p + 1}$$

где T_j – эквивалентная постоянная механической инерции агрегата турбина-генератор;

Передаточная функция звена, замещающего тепловую турбину:

$$W_T = \frac{1}{T_{\Pi} p + 1}$$

где T_{Π} – постоянная инерции турбины;

При задании упрощенной математической модели турбины используется передаточная функция одноцилиндровой турбины.

Передаточная функция звена, замещающего сервомотор автоматического регулятора частоты вращения:

$$W_{\text{см}} = \frac{1}{T_{\text{см}}p + 1}$$

где $T_{\text{см}}$ — постоянная времени гидравлического двигателя сервомотора .

Значения параметров математической модели исследуемого объекта регулирования представлены в таблице 3.2:

Таблица 3.2: Параметры математической модели энергоблока ВМК

Постоянная механической инерции турбины-генератора	Постоянная инерции ЦВД и ЦНД	Постоянная инерции сервомотора	Статизм регулятора скорости вращения
с	с	с	%
10	0,8	0,2	0,05

Тестирование регулятора выполняется на модели энергосистемы ВМК из состояния установившегося режима. Задание установившегося режима выполняется через специализированный интерфейс ВМК, который предназначен для создания необходимой схемно-режимной ситуации и задания параметров оборудования и режима. Интерфейс представлен на рисунке 42:

Таблица 3.4: Значения перетоков по линиям, соответствующие установившемуся режиму

ВЛ-503	ВЛ-502	ВЛ-501	ВЛ-210	ВЛ-209	ВЛ-208	ВЛ-207	ВЛ-204	ВЛ-203	ВЛ-202	ВЛ-108	ВЛ-105	ВЛ-104	ВЛ-103	ВЛ-102	ВЛ-101
МВт															
-17,62	-33,38	66,06	5,3	-12,08	-17,46	68,58	-13,55	-16,31	5,85	-50,56	31,17	31,21	-11,26	-32,65	-31,68

Значение частоты в установившемся режиме составляет 50,009 Гц.

Параметры загрузки генераторов в установившемся режиме представлены в таблице 3.5:

Таблица 3.5: Загрузка генераторов в установившемся режиме

ГРЭС 1	ГРЭС 2		ТЭЦ
Г-1	Г-2	Г-3	Г-4
МВт			
100	30	115	135

После задания сценария установившегося режима необходимо настроить МРС регулятор. На сервере, на котором находятся МРС регулятор и клиент СК-2007 запускается файл МРС_Controller.exe разработанного программного модуля МРС регулятора. После запуска приложения необходимо ввести параметры математической модели объекта регулирования (согласно таблице 3.2) и параметры прогнозирования:

The screenshot shows the MPC Controller interface with the following sections:

- Параметры математической модели** (Mathematical model parameters):
 - Постоянная механической инерции турбины - генератора T_J : 10
 - Постоянная инерции турбины T_t : 0.8
 - Постоянная инерции гидравлического сервомотора $T_{см}$: 0.2
 - Статизм регулятора частоты вращения R : 0.05
- Параметры прогнозирования** (Forecasting parameters):
 - Интервал измерений T_z : 1
 - Горизонт прогноза P : 300
 - Горизонт управления M : 25
- Настройка взаимодействия с ОИК** (Interaction with OIK settings):
 - Введите уставочное значение частоты: 50
 - Buttons: "Принять параметры математической модели", "Связаться с ОИК", "Начать регулирование"

Рисунок 43 – Интерфейс МРС регулятора

Параметры прогнозирования:

Интервал измерений T_s – 1 секунда;

Горизонт прогноза P – 300;

Горизонт управления – 25.

Затем нажимается кнопка **Принять параметры математической модели**.

Если параметры введены корректно, появится следующее диалоговое окно:

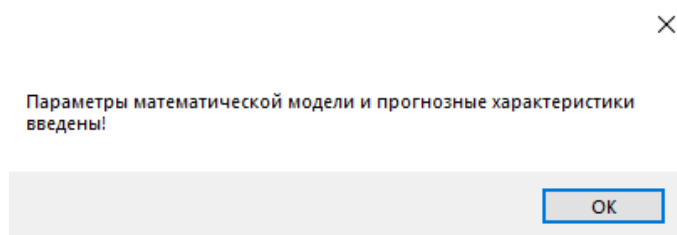


Рисунок 44 – Окно подтверждения корректного введения параметров математической модели

Следующим этапом вводится значение уставки частоты, нажимается кнопка **Связаться с ОИК**. После нажатия кнопки выполняется соединение с ОИК и в программный модуль поступает текущее значение частоты, о чем свидетельствует следующее сообщение:

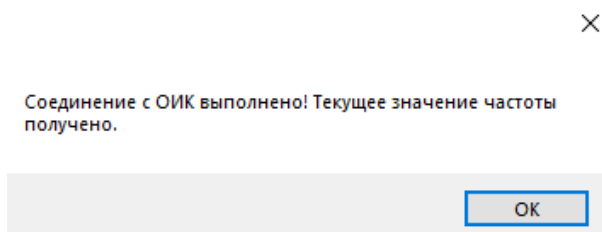


Рисунок 45 – Окно подтверждения соединения с ОИК

Последним этапом нажимается кнопка **Начать регулирование** и регулятор начнет расчет управляющих воздействий.

Программа исследований направлена на оценку эффективности регулирования, а именно оценку колебательности значения частоты и устойчивости режима при действии регулятора. Для оценки качества регулирования в замкнутой цикле в энергосистеме моделируется возмущение в виде отключения генератора Г-2 на ГРЭС2. Относительно реакции энергосистемы оценивается ряд критериев для описания формы переходного процесса:

- Максимум ошибки регулирования, а также момент времени T_{max} , при котором ошибка достигает этого максимума;

$$e_{max} = \max|e(t)|$$

- Декремент затухания $d = \frac{a}{b}$ - отношение первого максимума a ко второму b ;
- Перерегулирование e_{max} - превышение первого выброса над установившемся значением переменной. Обычно выражается в процентах от установившегося значения;
- Статическая ошибка - постоянная ошибка в равновесном (установившемся, статическом) режиме системы;
- Время нарастания - интервал времени, в течение которого выходная переменная нарастает от 10% до 90% от своего установившегося значения;

С помощью интерфейса программно-аппаратного комплекса ВМК выполняется отключение генератора Г2 от энергосистемы. В качестве сравнения эффективности МРС регулятора такой же опыт проводится при использовании интегрального регулятора. Коэффициент интегральной составляющей I регулятора согласно [4] равен 0,01.

Отображение процесса регулирования выполнено с помощью Редактора табличных форм, который является самостоятельным приложением оперативно-информационного комплекса СК-2007. Разработана форма, содержащая графики изменения частоты и управляющего воздействия:

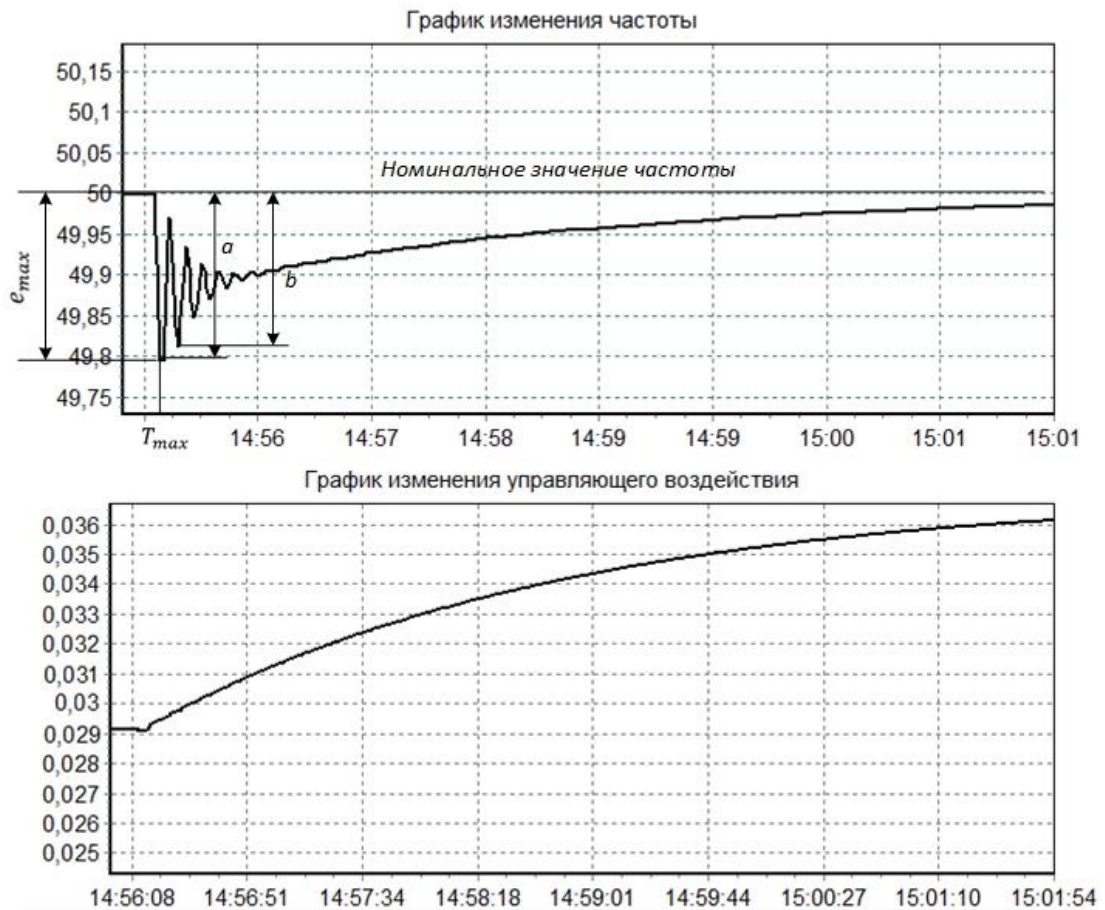


Рисунок 46 – Процесс регулирования частоты с использованием I регулятора при аварийном отключении Г-2

Критерии оценки качества регулирования при использовании I регулятора:

Максимум ошибки регулирования $e_{max} = 0,2$ Гц;

Момент времени, при котором ошибка достигает максимума $T_{max} = 8$ секунд с момента возникновения возмущения;

Декремент затухания $d = \frac{0,2}{0,198} = 1,01$;

Перерегулирование $e_{max} = 0,4\%$;

Статическая ошибка 0,015 Гц;

Время нарастания 2 секунды;

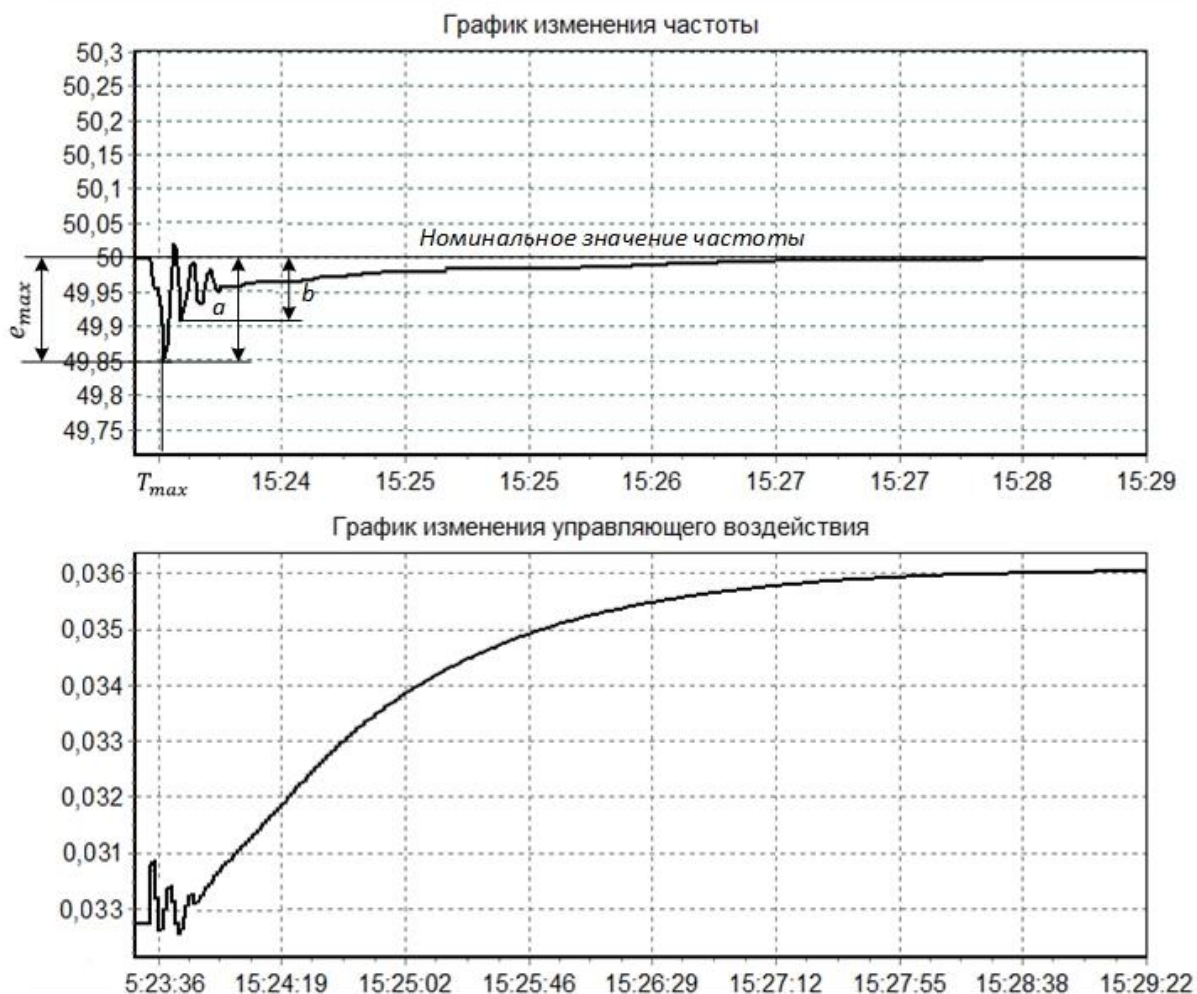


Рисунок 47 – Процесс регулирования частоты с использованием МРС регулятора при аварийном отключении Г-2

Критерии оценки качества регулирования при использовании МРС регулятора:

Максимум ошибки регулирования $e_{max} = 0,15$ Гц;

Момент времени, при котором ошибка достигает максимума $T_{max} = 9$ секунд с момента возникновения возмущения;

Декремент затухания $d = \frac{0,15}{0,09} = 1,67$;

Перерегулирование $e_{max} = 0,3\%$;

Статическая ошибка отсутствует;

Время нарастания 5 секунд;

Результаты анализа критериев качества регулирования при использовании разных типов регуляторов доказывают, что эффективность МРС регулятора выше, так как в случае его использования максимум ошибки регулирования,

а значит и перерегулирование меньше по сравнению со случаем использования интегрального регулятора. Значение декремента затухания в случае использования МРС регулятора больше, а значит апериодическая составляющая колебательного процесса меньше, что приводит значение частоты к заданному значению за меньшее время.

3.6. Анализ влияния неточности задания параметров математической модели на качество регулирования

По сравнению с традиционным интегральным I регулятором МРС регулятор имеет большее количество параметров при его настройке. В связи с этим целесообразно оценить влияние неверно введенных значений параметров математической модели.

Наиболее весомым параметром, который вносит наибольший вклад в величину управляющего воздействия, является эквивалентная постоянная инерции турбины-генератора T_j . Учитывая тот факт, что в среде моделирования реального времени используется модель двухцилиндровой турбины, а в МРС регуляторе модель турбины упрощена и представлена одним эквивалентным цилиндром, то возможно появление погрешности в задании эквивалентной постоянной инерции в модели МРС регулятора.

Для оценки влияния точности задания постоянной инерции/модели турбины при настройке МРС регулятора выполнен следующий опыт. При действительном значении постоянной инерции турбины – генератора равном 10 секунд, через интерфейс МРС регулятора задаются значения 6, 8, 12 и 14 секунд. Эксперимент выполняется в виде четырех сценариев, в каждом из которых задается одно неверное значение постоянной инерции турбины – генератора через интерфейс МРС регулятора при действительном значении $T_j = 10$ секунд, заданном в модели ВМК. В ходе опыта оцениваются максимальное значение разброса отклонения частоты A_{max} в обе стороны от

номинального значения частоты и время T_3 , за которое регулятор приведет значение частоты к допустимому заданному диапазону отклонений $\Delta f_{\text{заданное}}$. В качестве возмущения принято отключение генератора Г-2. Результаты эксперимента представлены на рисунке 48:

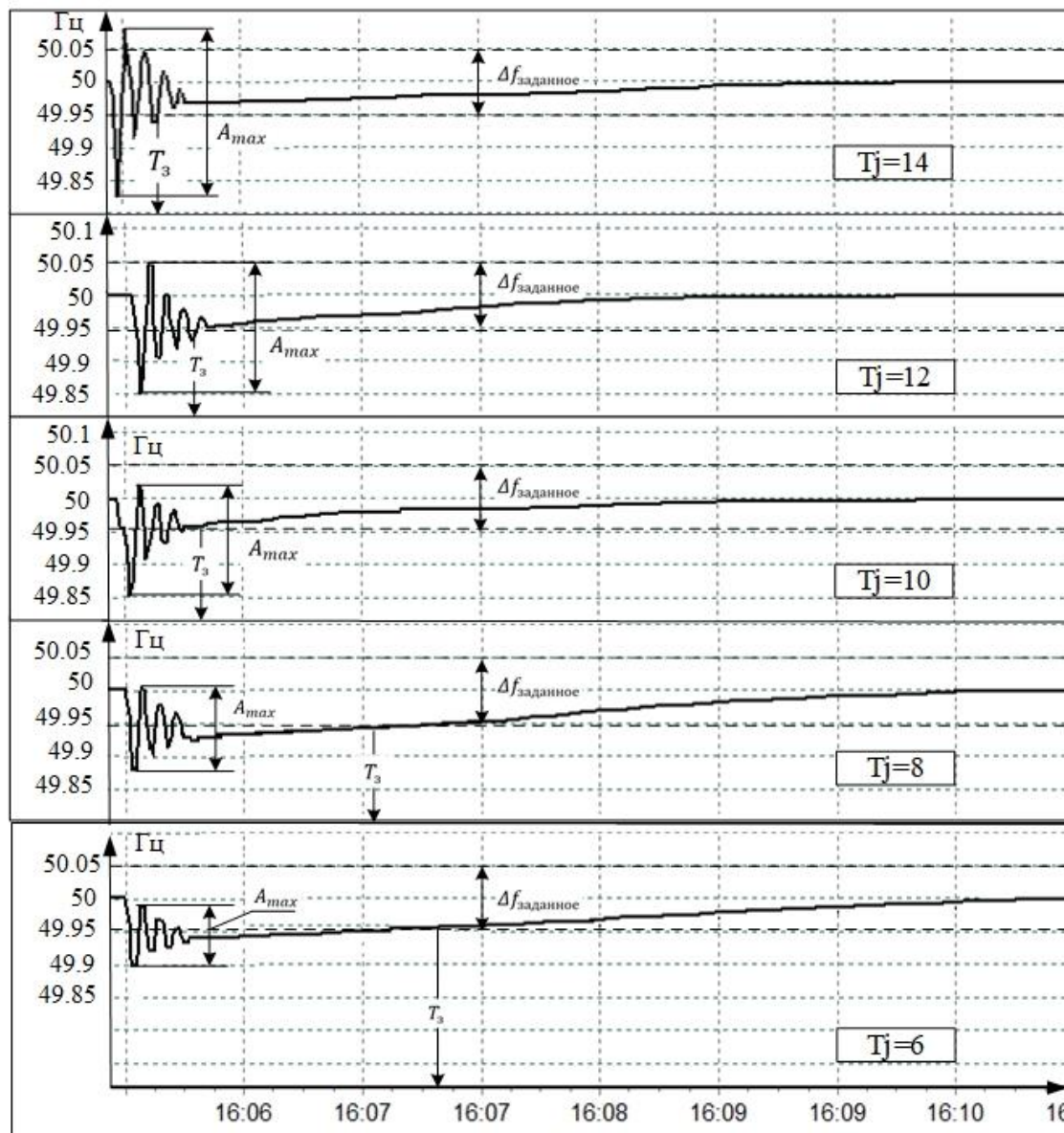


Рисунок 48 – Графики изменения частоты при различных вводимых значениях постоянной инерции турбины – генератора при действительном значении 10 секунд

Таблица 3.6: Зависимость параметров качества регулирования от значения постоянной инерции T_j

	Значения постоянной инерции T_j , с				
	6	8	10	12	14
Максимальное значение разброса отклонения частоты A_{max} , Гц	0,1	0,12	0,17	0,2	0,3
Время T_3 , за которое регулятор приводит значение частоты к допустимому заданному диапазону отклонений, с	160	125	40	45	23

Результаты опытов показали, что при действительном значении постоянной инерции турбины-генератора $T_j = 10$ секунд, максимальное значение разброса отклонения частоты A_{max} в обе стороны от номинального значения частоты составляет 0,17 Гц, время T_3 , за которое регулятор приводит значение частоты к допустимому заданному диапазону отклонений, составляет порядка 40 секунд.

При задании значения постоянной инерции турбины-генератора T_j больше действительного происходит увеличение максимального значения разброса отклонения частоты, но при этом уменьшается время T_3 . Так, для максимального оцененного значения $T_j = 14$ с, значение A_{max} составило 0,3 Гц, а значение $T_3 = 23$ секунды с момента возникновения возмущения. То есть регулятор выдает большее управляющее воздействие чем требуется, что вызывает увеличение амплитуды колебаний частоты, но при этом уменьшается время, за которое значение частоты достигает заданного диапазона значений.

Когда значения постоянной инерции турбины-генератора меньше действительного значения, наблюдается обратная зависимость. При значении T_j равном 6 секунд максимальное значение разброса отклонения частоты A_{max} составляет 0,1 Гц, а время T_3 за которое регулятор приводит значение частоты к допустимому заданному диапазону отклонений составляет 160 секунд с момента возникновения возмущения.

Критериями оценки полученных результатов является максимальное допустимое отклонение частоты $\pm 0,4$ Гц и время, за которое вторичный регулятор должен привести значение частоты к заданному диапазону значений – 15 минут, согласно [1]. Данный опыт позволяет установить, что в случаях, когда точное значение постоянной инерции турбины-генератора T_j неизвестно, то возможно воспользоваться типовым значением T_j для заданной мощности агрегата, причем изменение этого значения в интервале от $0,6 \cdot T_j$ до $1,4 \cdot T_j$ удовлетворяет требованиям, предъявляемым ко вторичному регулированию частоты.

3.7. Заключение к Главе 3

В ходе работы над Главой 3 исследованы и решены следующие задачи:

1. Программная реализация алгоритма расчета управляющих воздействий и разработка графического интерфейса. Для решения данных задач использовалось программное обеспечение MATLAB и реализованное на его базе встроенное приложение Library Compiler для решения задачи алгоритмизации, а также среда программирования Visual Studio для разработки графического интерфейса МРС регулятора. Результатом является приложение, созданное на базе интерфейса программирования приложений Windows Forms. Функционал приложения позволяет настраивать такие параметры МРС регулятора, как параметры математической модели объекта регулирования, параметры прогнозирования, а также обеспечивать соединение с ОИК СК-2007.

2. Для апробации разработанного приложения был выбран подход к тестированию Software in the loop, предполагающий испытания программного обеспечения в замкнутом контуре, который включает в себя среду моделирования, имитирующую объект регулирования, разработанное приложение, а также средства информационного взаимодействия. Для этого

разработана система замкнутого типа, состоящая из трех основных компонентов: МРС регулятор, всережимный моделирующий комплекс (ВМК) и оперативно-информационный комплекс СК-2007. Процесс обеспечения передачи и использования телеметрической информации реализован за счет инструмента «Компонент доступа к данным», обеспечивающего доступ к оперативной информации, а также использования протокола передачи технологической информации МЭК 60870-5-104.

3. В заключительной части Главы 3 описаны результаты тестирования разработанного МРС регулятора, при возникновении возмущения в смоделированной энергосистеме, с последующим анализом качества регулирования частоты. Для сравнительной оценки эффективности МРС регулятора выполнен опыт регулирования частоты с использованием интегрального регулятора. Анализ полученных результатов позволил установить, что качество регулирования с помощью МРС регулятора выше по отношению к опыту с использованием I регулятора в рамках заданной модели энергосистемы. Проведен эксперимент, результаты которого отображают зависимость качества регулирования частоты от корректности задания параметров математической модели объекта регулирования.

Заключение

В период работы над магистерской диссертацией выполнялась работа по трем направлениям: изучение принципов построения и работы современной системы АРЧМ, изучение основ и математического аппарата метода управления по прогнозным моделям и разработка программного модуля – MPC регулятора, обеспечивающего автоматическое регулирование частоты в изолированной энергосистеме.

В первой части магистерской диссертации были рассмотрены и изучены особенности и реализация системы автоматического вторичного регулирования АРЧМ с целью использования и применения полученных знаний при разработке прототипа MPC регулятора.

Исследованы основы метода управления по прогнозным моделям, а использующийся на его основе алгоритм расчета управляющих воздействий был применен для решения задачи автоматического регулирования частоты в изолированной энергосистеме. Проведен сравнительный анализ эффективности регулирования частоты в одномашинной энергосистеме с помощью MPC и I регуляторов в программном комплексе MATLAB. Результаты опытов показали, что процесс регулирования частоты с помощью MPC регулятора по сравнению с использованием I регулятора эффективнее в маломощных энергосистемах с низкими значениями постоянных инерции основного оборудования. В энергосистемах с большой мощностью генерации и высокой инерционностью оборудования принципиальные отличия в регулировании отсутствуют.

Разработан программный модуль – прототип MPC регулятора с использованием языков программирования C# и MATLAB способный работать в качестве EMS приложения, взаимодействуя с объектом регулирования через оперативно информационный комплекс СК-2007 с использованием протокола обмена телеметрической информацией МЭК 60870-5-104. Работоспособность регулятора была проверена на модели

энергосистемы во всережимном моделируемом комплексе (ВМК). Полученные результаты количественно совпали с результатами моделирования, проведенными в программном комплексе MATLAB.

Таким образом, результаты исследований подтверждают возможность использования метода управления по прогнозным моделям для решения задачи АРЧ, а также демонстрируют преимущество данного метода в особенности для энергосистем, характеризующихся малой инерцией.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6Д	Беляеву Александру Сергеевичу

Школа	Инженерная школа энергетики	Подразделение	Отделение электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов определялась по средней стоимости по г. Томску
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Премияльный коэффициент 40%; Районный коэффициент 1,3
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды 30,2 %
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Морфологический метод. Анализ конкурентных технических решений.
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Формирование плана и графика разработки: - определение структуры работ; - определение трудоемкости работ; - разработка графика Ганта. Формирование бюджета затрат на научное исследование: - материальные затраты; - заработная плата (основная и дополнительная); - отчисления на социальные цели; - накладные расходы.
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	
1. <i>Иерархическая структура работ.</i> 2. <i>График Ганта</i> 3. <i>График загрузки исполнителя работ</i>	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент школы инженерного предпринимательства	Попова Светлана Николаевна	к.э.н, доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Д	Беляев Александр Сергеевич		

Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Научно-исследовательская работа направлена на разработку программного модуля – регулятора, предназначенного для автоматического регулирования частоты на основе метода управления по прогнозным моделям. В работе рассматривается применение проектируемого модуля в качестве основного регулятора частоты и замена им традиционного I-регулятора.

Целью данной главы является определение потенциала НИР, планирование процесса управления исследованием, определение ресурсной, финансовой и экономической эффективности.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- Организация работ по научно-исследовательскому проекту
- Планирование научно-исследовательских работ
- Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

С учетом решения данных задач была сформирована структура и содержание данного раздела.

4.1. Предпроектный анализ

4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Основным потребителем проектируемого модуля являются диспетчерские центры АО «Системный оператор Единой энергетической системы», которые обеспечивают выполнение задачи автоматического регулирования частоты в энергосистеме.

Разрабатываемый модуль решает задачу регулирования на основе современного и перспективного направления в теории автоматического управления, которое называется управление по прогнозным моделям. Основное преимущество такого регулирования заключается в

прогнозировании поведения контролируемого параметра на некотором будущем интервале времени с возможностью его пересчета на каждом шаге дискретизации, что обеспечивает более точное и оптимальное регулирование.

4.1.2. Анализ конкурентных технических решений

На сегодняшний день для решения задачи регулирования частоты в объединенной энергосистеме используется I-регулятор. Существующая реализация I-регулятора обеспечивает простое решение задачи управления частотой, однако с ростом количества регулирующих электростанций и контролируемых сечений задача автоматического управления требует усложнения реализации регуляторов. Поэтому принято решение разработать программный модуль регулятора, работающего на основе метода управления по прогнозным моделям и реализовать алгоритм расчета управляющего воздействия для регулирования частоты на основе данного метода.

4.2. Планирование управления научно-техническим проектом

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей. [33]

4.2.1. Иерархическая структура работ

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта. Структура ИСР представлена на рисунке 1:

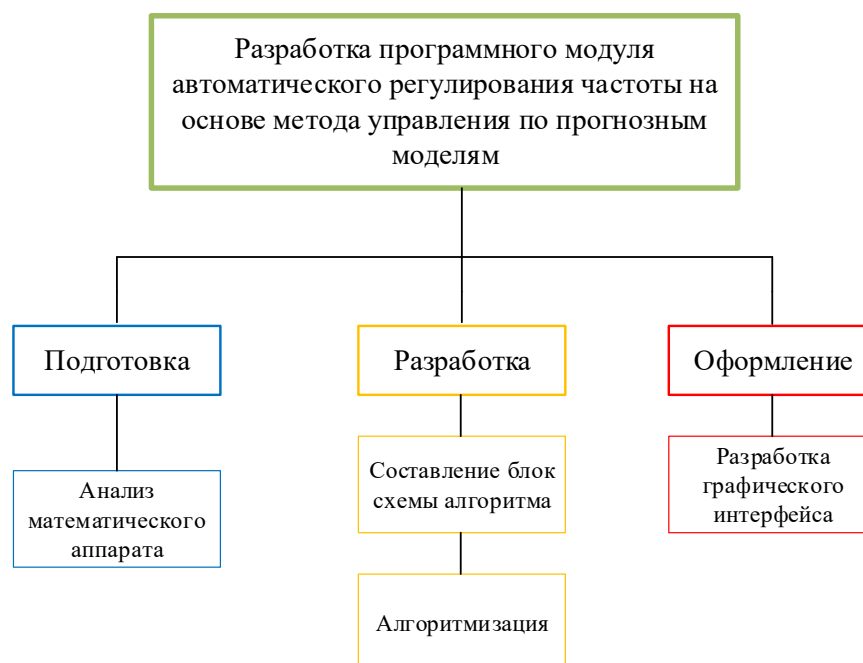


Рисунок 49 - Иерархическая структура работ

Занятость каждого из участников при проведении каждого из этапов работ должна быть оптимально спланирована по срокам. На каждом этапе выполнения работ определяются исполнители и продолжительность каждого этапа. Календарный график реализации проекта – это результат планирования работ. Он представляет из себя наиболее наглядный и удобный способ организации проекта. Для его построения определяются даты начала и окончания работ, а также составляется перечень работ и соответствие работ своим исполнителям. Основные исполнители в проекте: научный руководитель (Р) и инженер (И). Линейный график представлен в виде таблицы:

Таблица 4.1: Линейный план проекта

Название задачи	Длительность	Начало	Окончание	Состав участников
Разработка программного модуля для автоматического регулирования частоты	504 дня	01.02.2017	20.06.2018	Р, И
Планирование работ	75 дней	01.02.2017	16.04.2017	Р
Подготовка к разработке	49 дней	29.04.2017	17.06.2017	И
Поиск и изучение нормативно-	15 дней	29.04.2017	30.05.2017	И

технической литературы				
Анализ и исследование современной системы АРЧМ	30 дней	01.07.2017	30.07.2017	И
Изучение требований предъявляемых к системе АРЧМ	30 дней	01.07.2017	30.07.2017	И
Изучение метода управления по прогнозным моделям	76 дней	01.07.2017	15.09.2017	И
Моделирование одномашинной энергосистемы в программном комплексе MATLAB	30 дней	17.09.2017	17.10.2017	И
Сравнительный анализ регулирования частоты с помощью I(D) и MPC регуляторов	12 дней	19.10.2017	31.10.2017	И
Разработка программного модуля - автоматического регулятора частоты на основе метода управления по прогнозным моделям	100 дней	01.11.2017	10.03.2018	И
Проверка работы программного модуля	45 дней	15.03.2018	29.04.2018	И
Составление раздела финансового менеджмента и социальной ответственности	21 дней	19.03.2018	09.04.2018	И
Составление раздела финансового менеджмента	7 дней	19.03.2018	26.03.2018	И
Составление раздела социальная ответственность	14 дней	26.03.2018	09.04.2018	И
Оформление расчетно-пояснительной записки	263 дня	25.09.2017	15.06.2018	И

На основе календарного плана проекта построена диаграмма Ганта [Приложение 1], которая наглядно показывает следование выполнения этапов дипломного проектирования, исходя из отведенных сроков. Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм, который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Основная часть проектирования сосредоточена на этапах работы с документацией и изучения метода управления по прогнозным моделям, а также разработки программного модуля на основе изучаемого метода. Исходя из этого целесообразно изобразить график загрузки исполнителя работ в период работы над проектом (Приложение 2). График загрузки наглядно отображает затрачиваемое время в часах на выполнение конкретного этапа работ в течение всего времени проектирования. Прерывистость графика объясняется учетом выходных дней, в которые работа не выполнялась. Большую часть времени проектирования работа над проектом занимала по шесть часов в день. В период с 01.08.2017 по 01.09.2017 наблюдается снижение загрузки работы до получаса в день ввиду летнего отпуска студента. Во время периода подготовки к сессии наблюдается снижение загрузки работ по проекту, а в непосредственный период сессии загрузка снижается до нуля.

4.3. Бюджет проекта

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям:

- накладные расходы;
- затраты на вознаграждение студента

4.4.1 Накладные расходы

Накладные расходы включают в себя затраты на обучение студента и формирование у студента необходимых профессиональных компетенций. Согласно Договору № 959 от 01 сентября 2016 года АО «Системный оператор Единой энергетической системы» обязуется оплатить образовательные услуги по дополнительному профессиональному

образованию студента по плану профессиональной программы «Автоматизированные системы диспетчерского управления электроэнергетических систем». Стоимость обучения по данной программе составляет 78650 рублей за один учебный семестр. Таким образом накладные расходы за период обучения студента в магистратуре (4 семестра) и выполнения им проекта составляют 314600 рублей

4.4.2 Затраты на вознаграждение студента

Согласно трудовому договору № 50-17 с между АО «СО ЕЭС» и студентом, за выполнение обязанностей по должности, занимаемой студентом, ему устанавливается должностной оклад в размере 8451 рублей в месяц, с оплатой пропорционально фактически отработанному времени.

По соглашению между Сторонами трудового договора № 50-17 студенту устанавливается:

- Неполное рабочее время продолжительностью 10 часов в неделю
- Пятидневная рабочая неделя с двумя выходными

Должностной оклад рассчитан на рабочее время продолжительностью 40 часов в неделю. Исходя из того, что студент трудоустроен на неполное рабочее время, то величина оклада составляет 0,25 от 8451 рублей, то есть 2113 рублей. Студенту устанавливается районный коэффициент к заработной плате в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 13.05.1992 г. № 309 «О повышении районных коэффициентов в отдельных районах и городах Томской области» в размере 1,3.

Также согласно трудовому договору студенту причитается ежемесячная премия в размере 40% от размера оклада.

Таким образом заработная плата студента в месяц составляет:

$$З_{\text{месяц}} = (З_{\text{оклад}} + З_{\text{премия}}) \cdot 1,3 = (2113 + 0,4 \cdot 2113) \cdot 1,3 = 3845 \text{ рублей}$$

Также предприятие выполняет обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам

государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работника в размере 30,2%. [36]

Исходя из того, что период обучения студента составляет 24 месяца, то суммарные затраты на вознаграждение студента представлены в Таблице 4.2:

Таблица 4.2: Затраты на вознаграждение студента

	Затраты в месяц, руб.	Итого за проектный период, руб.
Основная заработная плата	3845	92280
Отчисления на собственные нужды	1161	27864
Итого	120144	

Суммируя накладные расходы и расходы на вознаграждение студента, получим полную сумму расходов за период обучения:

$$P_{\Sigma} = P_H + P_B = 314600 + 120144 = 434744 \text{ рубля}$$

4.4. Ожидаемая эффективность и эффекты проекта

Основная цель проекта заключается в исследовании метода управления по прогнозным моделям для решения задачи регулирования частоты в энергосистеме. Сравнение эффективности и качества регулирования традиционного I регулятора по отношению к исследуемому МРС регулятору показало преимущества последнего, что в свою очередь в качестве ожидаемого эффекта проекта подразумевает внедрение разработанного программного модуля – автоматического регулятора частоты, принцип работы которого основан на использовании управления по прогнозным моделям, в диспетчерские центры компании АО «СО ЕЭС».

Полученные результаты исследования такие, как осциллограммы моделирования в программном комплексе MATLAB, показали, что

регулятор, работающий на основе метода управления по прогнозным моделям, обеспечивает более эффективный закон регулирования, что с точки зрения ожидаемой эффективности позволит вырабатывать оптимальные управляющие воздействия и рационально использовать регулировочный диапазон электрических станций.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6Д	Беляеву Александру Сергеевичу

Школа	Инженерная школа энергетики	Подразделение	Отделение электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Магистратура	Направление	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p>Объектом исследования является программный модуль – автоматический регулятор частоты, в основе алгоритма работы которого реализован метод управления по прогнозным моделям. Данное программный модуль может использоваться в технологической деятельности АО «СО ЕЭС», проектных бюро, а также в учебных целях.</p>
---	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Производственная безопасность</p> <p>1.1 Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты; – (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства). <p>1.2 Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электроопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения). 	<p>Воздействие на исследователя физических факторов, таких как, повышенный уровень электромагнитных полей, недостаточная освещенность рабочей зоны, повышенный уровень шума на рабочем месте, повышенная или пониженная влажность, температура и скорость движения воздуха, опасность поражения электрическим током.</p>
<p>2. Экологическая безопасность</p> <ul style="list-style-type: none"> – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); 	<p>Утилизация компьютерной техники и периферийных устройств</p>

– разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.	
3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях: – перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – выбор наиболее типичной ЧС; разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.	Возможны возгорания в следствии короткого замыкания из-за ошибки персонала и нарушения целостности электрических проводов. Наиболее типичная ЧС - пожар. Основными мероприятиями по пожарной безопасности являются проведение пожарной профилактики, наличие противопожарного водопровода оборудования, а также средств оповещения.
4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	Были рассмотрены специальные правовые нормы трудового законодательства и организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения контроля и диагностики	Амелькович Юлия Александровна	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Д	Беляев Александр Сергеевич		

Глава 5. Социальная ответственность

Научно-исследовательская работа направлена на разработку программного модуля – регулятора, предназначенного для автоматического регулирования частоты на основе метода управления по прогнозным моделям. В работе рассматривается применение проектируемого модуля в качестве основного регулятора частоты и замена им традиционного I-регулятора.

Основным потребителем проектируемого модуля являются диспетчерские центры АО «Системный оператор Единой энергетической системы», которые обеспечивают выполнение задачи автоматического регулирования частоты в энергосистеме.

Разрабатываемый модуль решает задачу регулирования на основе современного и перспективного направления в теории автоматического управления, которое называется управление по прогнозным моделям. Основное преимущество такого регулирования заключается в прогнозировании поведения контролируемого параметра на некотором будущем интервале времени с возможностью его пересчета на каждом шаге дискретизации, что обеспечивает более точное и оптимальное регулирование.

5.1. Производственная безопасность

Разрабатываемый программный модуль представляет собой алгоритм расчета управляющего воздействия на основе получения телеметрической информации с объекта управления. Программный модуль подразумевает использование на серверном оборудовании (ЭВМ), работающем в режиме реального времени ежедневно и круглосуточно. С точки зрения Социальной ответственности целесообразно рассмотреть вредные и опасные факторы, которые могут возникать при разработке программного модуля или работе с

серверным оборудованием, а также требования по организации рабочего места.

5.1.1. Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования, а также которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований

Для выбора факторов использовался ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [38]. Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды представлен в виде таблицы:

Таблица 5.1: Опасные и вредные факторы при выполнении работ по разработке программного модуля

Источник фактора, наименование вида работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-2015)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
1) Разработка программного модуля – автоматического регулятора частоты 2) Работа с серверным оборудованием	1. Повышенный уровень электромагнитных полей; 2. Недостаточная освещенность рабочей зоны; 3. Повышенный уровень шума на рабочем месте; 4. Повышенная или пониженная влажность, температура и скорость движения воздуха;	1. Электрический ток	СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 СанПиН 2.2.2.542-96 СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 СанПиН 2.2.4.1191-03 СП 52.13330.2011 СанПиН 2.2.4.548-96 СН 2.2.4/2.1.8.562-96 ГОСТ 30494-2011

5.1.2. Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.

При разработке и использовании программного модуля основным источником опасных факторов является компьютерная техника (ЭВМ), а именно серверное оборудование, а также электрический ток, являющийся источником питания для оборудования. Использование данного оборудования может привести к наличию таких вредных факторов, как повышенный уровень статического электричества, повышенный уровень электромагнитных полей, повышенная напряженность электрического поля.

К основной документации, которая регламентирует вышеперечисленные вредные факторы относится СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к электронно-вычислительным машинам и организации работы":

ЭВМ должны соответствовать требованиям настоящих санитарных правил и каждый их тип подлежит санитарно-эпидемиологической экспертизе с оценкой в испытательных лабораториях, аккредитованных в установленном порядке.

Допустимые уровни электромагнитных полей (ЭМП), создаваемых ЭВМ, не должны превышать значений [40], представленных в таблице 5.2:

Таблица 5.2: Допустимые уровни ЭМП, создаваемых ЭВМ

Наименование параметров	Диапазон	ДУ ЭМП
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	25нТл
Поверхностный электростатический потенциал экрана видеомонитора		500В

Требования к электрической безопасности при работе на ЭВМ:

Для предотвращения поражения электрическим током помещения, где размещаются рабочие места с ЭВМ, должны быть оборудованы защитным заземлением (занулением) в соответствии с техническими требованиями по эксплуатации.

Не следует размещать рабочие места с ЭВМ вблизи силовых кабелей и вводов, высоковольтных трансформаторов, технологического оборудования, создающего помехи в работе ЭВМ. [41]

Согласно разделу 1.1.13 правил устройства электроустановок (ПУЭ) [54] классификация помещений по степени опасности поражения электрическим током подразумевает разделять помещения на три отдельных категории, характеризующих степень опасности:

1. Особо опасные;
2. С повышенной опасностью.
3. Без повышенной опасности.

Помещение, предназначенное для исследования и использования результатов исследования, относится к третьей категории. Помещения без повышенной опасности - это помещения, в которых отсутствует сырость, высокая температура, токопроводящие полы, токопроводящая пыль, химическая среда. В данную категорию входят помещения, характеризующиеся пониженной влажностью воздуха (до 75%), оборудованные при необходимости вентиляционной системой и отоплением. Кроме того, полы в таких помещениях должны быть не токопроводящими.

Требования к освещению на рабочих местах, оборудованных ЭВМ:

Рабочие столы следует размещать таким образом, чтобы видеодисплейные терминалы были ориентированы боковой стороной к световым проемам, чтобы естественный свет падал преимущественно слева.

Искусственное освещение в помещениях для эксплуатации ЭВМ должно осуществляться системой общего равномерного освещения. В производственных и административно-общественных помещениях, в случаях

преимущественной работы с документами, следует применять системы комбинированного освещения (к общему освещению дополнительно устанавливаются светильники местного освещения, предназначенные для освещения зоны расположения документов).

Освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300 - 500 лк. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк. [42]

В качестве источников света при искусственном освещении следует применять преимущественно люминесцентные лампы типа ЛБ и компактные люминесцентные лампы (КЛЛ). При устройстве отраженного освещения в производственных и административно-общественных помещениях допускается применение металлогалогенных ламп. В светильниках местного освещения допускается применение ламп накаливания, в том числе галогенные.

Таблица 5.3: Нормируемые показатели естественного, искусственного и совмещенного освещения помещений жилых зданий [39]

Помещение	Рабочая поверхность и плоскость нормирования КЕО и освещенности и высота плоскости над полом, м	Естественное освещение		Совмещенное освещение		Искусственное освещение		
		КЕО e_n , %		КЕО e_n , %				
		При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении	При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении	Освещенность рабочих поверхностей, лк	Показатель дисконтности М, не более	Коэффициент пульсации освещенности, К _п , %, не более
Кабинеты	Г-0,0	3,0	1,0	1,8	0,6	300	-	-

Требования к уровню шума

Характеристикой постоянного шума на рабочих местах являются уровни звукового давления в дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000 Гц, определяемые по формуле:

$$L = 20 \lg \frac{P}{P_0}$$

где P - среднеквадратичная величина звукового давления, Па;

P_0 - исходное значение звукового давления в воздухе, равное $2 \cdot 10^{-5}$ Па;

Предельно допустимые уровни звукового давления в октавных полосах частот, уровни звука и эквивалентные уровни звука для основных наиболее типичных видов трудовой деятельности и рабочих мест, разработанные с учетом категорий тяжести и напряженности труда, представлены в таблице 5.4:

Таблица 5.4: Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука для основных наиболее типичных видов трудовой деятельности и рабочих мест

N пп.	Вид трудовой деятельности, рабочее место	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука (дБА)
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Творческая деятельность, руководящая работа с повышенными требованиями, научная деятельность, конструирование и проектирование, программирование, преподавание и	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

обучение, врачебная деятельность. Рабочие места в помещениях дирекции, проектно-конструкторских бюро, расчетчиков, программистов вычислительных машин, в лабораториях для теоретических работ и обработки данных, приема больных в здравпунктах										
---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Требования к микроклимату

В помещениях жилых и общественных зданий следует обеспечивать оптимальные или допустимые параметры микроклимата в обслуживаемой зоне. Микроклимат производственных помещений – это климат внутренней среды этих помещений, который определяется действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности и скорости движения воздуха

Оптимальные величины показателей микроклимата необходимо соблюдать на рабочих местах производственных помещений, на которых выполняются работы, связанные с нервно-эмоциональным напряжением (на постах управления технологическими процессами, в залах вычислительной техники и др.).

Согласно нормативно-технической документации при нормировании параметров микроклимата выделяют холодный период года, характеризуемый среднесуточной температурой наружного воздуха, равной $+10^{\circ}\text{C}$ и ниже и теплый период года, характеризуемый среднесуточной температурой наружного воздуха выше $+10^{\circ}\text{C}$. Разграничение работ по категориям осуществляется на основе интенсивности общих энергозатрат организма в ккал/ч (Вт). [43]

Лаборатория является помещением I а категории (с интенсивностью энерготрат до 120 ккал/ч, производимые сидя и сопровождающиеся незначительным физическим напряжением), поэтому должны соблюдаться следующие требования, приведенные в таблице 5.5:

Таблица 5.5 – Оптимальные параметры микроклимата во всех типах помещений с использованием ПЭВМ [49]

Температура, °С	Относ. влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
19	62	< 0,1
20	58	< 0,1
21	55	< 0,1

Допустимые величины интенсивности теплового облучения работающих на рабочих местах от производственных источников, нагретых до темного свечения (материалов, изделий и др.) должны соответствовать значениям, приведенным в таблице 5.6[7]:

Таблица 5.6 – Допустимые величины интенсивности теплового облучения

Облучаемая поверхность тела, %	Интенсивность теплового облучения, Вт/м ² , не более
50 и более	35
25-50	70
не более 25	100

В помещениях, оборудованных ПЭВМ, проводится ежедневная влажная уборка и систематическое проветривание после каждого часа работы на ЭВМ.

Для создания и автоматического поддержания в лаборатории независимо от наружных условий оптимальных значений температуры, влажности, чистоты и скорости движения воздуха, в холодное время года используется водяное отопление, в теплое время года применяется кондиционирование воздуха. Кондиционер представляет собой вентиляционную установку, которая с помощью приборов автоматического регулирования поддерживает в помещении заданные параметры воздушной среды.

5.2. Экологическая безопасность

В данном подразделе рассматривается характер воздействия проектируемого решения на окружающую среду. Выявляются предполагаемые источники загрязнения окружающей среды, возникающие в результате реализации предлагаемых в ВКР решений.

5.2.1. Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду.

Программный модуль – автоматический регулятор частоты является программным алгоритмом и не наносит вреда окружающей среде. С точки зрения влияния на окружающую среду можно рассмотреть влияние серверного оборудования при его утилизации.

Большинство компьютерной техники содержит бериллий, кадмий, мышьяк, поливинилхлорид, ртуть, свинец, фталаты, огнезащитные составы на основе брома и редкоземельные минералы [44]. Это очень вредные вещества, которые не должны попадать на свалку после истечения срока использования, а должны правильно утилизироваться.

Утилизация компьютерного оборудования осуществляется по специально разработанной схеме, которая должна соблюдаться в организациях:

1. На первом этапе необходимо создать комиссию, задача которой заключается в принятии решений по списанию морально устаревшей или не рабочей техники, каждый образец рассматривается с технической точки зрения.
2. Разрабатывается приказ о списании устройств. Для проведения экспертизы привлекается квалифицированное стороннее лицо или организация.
3. Составляется акт утилизации, основанного на результатах технического анализа, который подтверждает негодность оборудования для дальнейшего применения.

4. Формируется приказ на утилизацию. Все сопутствующие расходы должны отображаться в бухгалтерии.
5. Утилизацию оргтехники обязательно должна осуществлять специализированная фирма.
6. Получается специальная официальной формы, которая подтвердит успешность уничтожения электронного мусора.

После оформления всех необходимых документов, компьютерная техника вывозится со склада на перерабатывающую фабрику. Все полученные в ходе переработки материалы вторично используются в различных производственных процессах. [9]

5.2.2. Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду.

Процесс исследования представляет из себя работу с информацией, такой как технологическая литература, статьи, ГОСТы и нормативно-техническая документация, а также разработка программного кода на языках программирования MATLAB и C#. Таким образом процесс исследования не имеет влияния негативных факторов на окружающую среду.

5.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

5.3.1. Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС

Согласно ГОСТ Р 22.0.02-94 ЧС - это нарушение нормальных условий жизни и деятельности людей на объекте или определенной территории (акватории), вызванное аварией, катастрофой, стихийным или экологическим бедствием, эпидемией, эпизоотией (болезнь животных), эпифитотией (поражение растений), применением возможным противником современных средств поражения и приведшее или могущее привести к людским или материальным потерям".

С точки зрения выполнения проекта характерны следующие виды ЧС:

1. Пожары, взрывы;
2. Внезапное обрушение зданий, сооружений;
3. Геофизические опасные явления (землетрясения);
4. Метеорологические и агрометеорологические опасные явления;

Так как объект исследований представляет из себя программный модуль, работающий на сервере, то наиболее вероятной ЧС в данном случае можно назвать пожар в серверной. В серверной комнате применяется дорогостоящее ИТ-оборудование, не горючие и не выделяющие дым кабели. Таким образом возникновение пожаров происходит из-за человеческого фактора, в частности, это несоблюдение правил пожарной безопасности [45]. К примеру, замыкание электропроводки - в большинстве случаев тоже человеческий фактор. Соблюдение современных норм пожарной безопасности позволяет исключить возникновение пожара в серверной комнате.

- Согласно СП 5.13130.2009 предел огнестойкости серверной должен быть следующим: перегородки - не менее EI 45, стены и перекрытия - не менее REI 45. Т.е. в условиях пожара помещение должно оставаться герметичным в течение 45 минут, препятствуя дальнейшему распространению огня.
- Помещение серверной должно быть отдельным помещением, функционально не совмещенным с другими помещениями. К примеру, не допускается в помещении серверной организовывать мини-склад ИТ-оборудования или канцелярских товаров.
- Дверь в помещение серверной также должна обеспечивать требования по огнестойкости (не менее EI 45). Необходимо использовать противопожарную дверь.
- При разработке проекта серверной необходимо учесть, что автоматическая установка пожаротушения (АУПТ) должна быть

обеспечена электропитанием по первой категории (п. 15.1 СП 5.13130.2009).

- Согласно СП 5.13130.2009 в системах воздуховодов общеобменной вентиляции, воздушного отопления и кондиционирования воздуха защищаемых помещений следует предусматривать автоматически закрывающиеся при обнаружении пожара воздушные затворы (заслонки или противопожарные клапаны).

5.3.2. Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при проведении исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС

При проведении исследований наиболее вероятной ЧС является возникновение пожара в помещении. Пожарная безопасность должна обеспечиваться системами предотвращения пожара и противопожарной защиты, в том числе организационно-техническими мероприятиями.

Под пожарной профилактикой понимается обучение пожарной технике безопасности и комплекс мероприятий, направленных на предупреждение пожаров.

Задачи пожарной профилактики можно разделить на три комплекса мероприятий:

- обучение, в т.ч. распространение знаний о пожаробезопасном поведении (о необходимости установки домашних индикаторов задымленности и хранения зажигалок и спичек в местах, недоступных детям);
- пожарный надзор, предусматривающий разработку государственных норм пожарной безопасности и строительных норм, а также проверку их выполнения;
- обеспечение оборудованием и технические разработки (установка переносных огнетушителей и изготовление зажигалок безопасного пользования).

В соответствии с ТР «О требованиях пожарной безопасности» для административного жилого здания требуется устройство внутреннего противопожарного водопровода.

Согласно НПБ 104-03 "Проектирование систем оповещения людей о пожаре в зданиях и сооружениях" для оповещения о возникновении пожара в каждом помещении должны быть установлены дымовые оптико-электронные автономные пожарные извещатели, а оповещение о пожаре должно осуществляться подачей звуковых и световых сигналов во все помещения с постоянным или временным пребыванием людей.

Также помещения должны быть оснащены средствами пожаротушения, а именно огнетушителями типа ОУ-2, ОУ-5 или ОП-5 (предназначены для тушения любых материалов, предметов и веществ, применяется для тушения ПК и оргтехники).

Согласно НПБ 105-03 помещение, предназначенное для проектирования и использования результатов проекта, относится к типу В1 – пожароопасное:

Таблица 5.6: Категории помещений по взрывопожарной и пожарной опасности

Категория помещения	Характеристика веществ и материалов, находящихся (обращающихся) в помещении
В1 пожароопасные	Горючие и трудногорючие жидкости, твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы (в том числе пыли и волокна), вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть, при условии, что помещения, в которых они имеются в наличии или обращаются, не относятся к категориям А или Б

5.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.4.1. Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства.

Согласно ТК РФ, N 197 -ФЗ каждый работник имеет право на:

- рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний в соответствии с федеральным законом;
- отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда, за исключением случаев, предусмотренных федеральными законами, до устранения такой опасности;
- обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;
- внеочередной медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра;

5.4.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

Рабочее место должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032-78. Оно должно занимать площадь не менее 6 м², высота помещения должна быть не менее 4 м, а объем - не менее 20 м³ на одного человека. Высота над уровнем пола рабочей поверхности, за которой работает оператор, должна составлять 720 мм. Оптимальные размеры поверхности стола 1600 x 1000 кв. мм. Под столом должно иметься пространство для ног с размерами по глубине 650 мм. Рабочий стол должен также иметь подставку для ног, расположенную под углом 15° к поверхности стола. Длина подставки 400 мм,

ширина - 350 мм. Удаленность клавиатуры от края стола должна быть не более 300 мм, что обеспечит удобную опору для предплечий. Расстояние между глазами оператора и экраном видеодисплея должно составлять 40 - 80 см. Так же рабочий стол должен быть устойчивым, иметь однотонное неметаллическое покрытие, не обладающее способностью накапливать статическое электричество. Рабочий стул должен иметь дизайн, исключающий онемение тела из-за нарушения кровообращения при продолжительной работе на рабочем месте.

Список использованной литературы

1. Стандарт: Регулирование частоты и перетоков активной мощности. Нормы и требования, АО «СО ЕЭС», Москва, 2014
2. Описание: Унифицированное программное обеспечение Центральной координирующей системы автоматического регулирования частоты и перетоков мощности Единой энергетической системы России/Централизованной системы автоматического регулирования частоты и перетоков мощности объединенной энергетической системы на платформе СК-2007, АО «НТЦ ЕЭС», Москва 2017
3. Системы управления частотой и активной мощностью в электроэнергетических системах [Электронный ресурс] – URL: http://www.energystrategy.ru/projects/Energy_21/, Дата обращения 11.10.2017
4. Положение по использованию ЦС АРЧМ Кольской энергосистемы при управлении режимами работы энергосистемы в операционной зоне филиала АО «СО ЕЭС» Кольское РДУ, Мурманши 2016
5. Основные технические требования к параллельно работающим энергосистемам стран СНГ и Балтии: Правила и рекомендации по регулированию частоты и перетоков, АО «СО ЕЭС», 2007
6. Стандарт: Нормы участия генерирующего оборудования тепловых электростанций в нормированном первичном регулировании частоты и автоматическом регулировании частоты и перетоков активной мощности, АО «СО ЕЭС», Москва 2016
7. Техничко-экономическое обоснование: Проект Центральных систем автоматического регулирования частоты и перетоков активной мощности ОЭС Северо –Запада, АО «СО ЕЭС», Москва 2006
8. Приложение №2: Общие технические требования для подключения ТЭС к ЦС (ЦКС) АРЧМ, АО «СО ЕЭС»

9. Жуков А.В. «Современное состояние и перспективы развития систем РЗА в ЕЭС России», 4-я Международная научно-техническая конференция, Екатеринбург, 2013
10. Жуков А.В. Журнал «Энергия объединенной сети», номер 6, 2014
11. Na Li, Lijun Chen, Changhong Zhao, Connecting Automatic Generation Control and Economic Dispatch from an Optimization View
12. Денисенко В. Статья, ПИД регуляторы: вопросы реализации, 2009
13. Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Серия экономика: №1 (7) 2014
14. АСУ ТП: 5 ПИД-регуляторы, Обзор публикаций
15. Е.И.Веремей, В.В.Еремеев. Статья, Введение в задачи управления на основе предсказаний, 2013
16. K. S. Holkar, L. M. Waghmare , An Overview of Model Predictive Control
17. Iason Avramiotis-Falireas*, Athanasios Troupakis, An MPC Strategy for Automatic Generation Control with Consideration of Deterministic Power Imbalances
18. Emad Ali Daood¹, Surya Prakash², Jyoti Shrivastava Improving Dynamic Performance of Automatic Generation Control of Interconnected Power System by Combing Parallel EHV AC/ HV DC link
19. Bhil S.K, Kamath A.K Transient Stability Enhancement Of Power System Using MPC Based TCSC Controller
20. Steliuk, A., Hinojosa, V.H. Flexible Automatic Generation Control System for Embedded HVDC Links, Loughborough University Institutional Repository, 2015
21. Инструкция по обслуживанию ЦС АРЧМ Кольской энергосистемы, Мурманши, 2016
22. Оперативно-диспетчерское управление в электроэнергетике. Регулирование частоты и перетоков активной мощности в ЕЭС и изолированно работающих энергосистемах России, АО «СО ЕЭС», 2012

23. MathWorks [Электронный ресурс], (дата обращения 11.10.2017) - <https://www.mathworks.com/help/mpc/index.html>, United States
24. Department of Automatic Control Lund Institute of Technology, Reference Manual: MPCtools 1.0, 2006
25. Load Frequency Control in Single Area System Using Model Predictive Control and Linear Quadratic Gaussian Techniques, Faculty of Energy Engineering, Aswan, Egypt, 2015
26. Model Predictive Control with Integral Action: A simple MPC algorithm, Telemark University College
27. J.M. Maciejowski, Predictive Control with Constraints
28. Alberto Bemporad, Manfred Morari. Model Predictive Control Toolbox for use with MATLAB, User's Guide
29. Р.А. Вайнштейн, В.В. Шестакова, И.М. Кац, Автоматическое управление электроэнергетическими системами в нормальных и аварийных режимах, Томск, 2013
30. В. А. Минин, Статья, Энергоэффективность и энергосбережение, Кольская энергосистема: состояние и перспективы развития, 2015
31. Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем, НИ ТПУ, Томск, 2016
32. Оперативный информационный комплекс СК-2007, Том 1 – Архитектура, ЗАО «Монитор Электрик», 2017
33. Гаврикова Н.А. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Н.А. Гаврикова, Л.Р. Тухватулина, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.В. Шаповалова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014
34. Королева Н.И Стратегический менеджмент: Учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, Томского политехнического университета, 2007

35. Корпоративный портал [Электронный ресурс] – URL: <http://portal.tpu.ru/departments/otdel/peo/documents>, Должностные оклады ППС и педагогических работников с 01.06.2016 г., Дата обращения: 20.03.2018
36. Консультант Плюс [Электронный ресурс] – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_89925/, Федеральный закон "О страховых взносах в Пенсионный фонд Российской Федерации, Фонд социального страхования Российской Федерации, Федеральный фонд обязательного медицинского страхования" от 24.07.2009 N 212-ФЗ, Дата обращения: 20.03.2018
37. Методические указания по разработке раздела «Социальная ответственность» выпускной квалификационной работы магистра, специалиста и бакалавра всех направлений (специальностей) и форм обучения ТПУ, Томск 2016
38. ГОСТ 12.0.003-2015 Опасные и вредные производственные факторы. Классификация, 2015
39. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий, 2003
40. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы, 2003
41. СанПиН 2.2.4.1191-03 Электромагнитные поля в производственных условиях, 2003
42. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение, 2011
43. СанПиН 2.2.4.548–96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений, 1996
44. СН 2.2.4/2.1.8.562–96, Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки, 1996
45. ГОСТ 30494-2011, Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях, 2011

46. ГОСТ 12.4.124-83 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования, 1984

47. Мир ПК [Электронный ресурс] URL: <https://www.osp.ru/pcworld/2013/06/13035804/>, Дата обращения: 22.03.2108

48. VTOR OTHODI [Электронный ресурс] URL: http://vtorothodi.ru/utilizaciya/utilizacija_kompjuterov, Дата обращения: 22.03.2108

49. Пожарная безопасность серверной комнаты [Электронный ресурс] URL: <https://avtoritet.net/library/press/245/15479/articles/15515>, Дата обращения: 22.03.2108

50. Системы противопожарной защиты УСТАНОВКИ ПОЖАРНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ И ПОЖАРОТУШЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИЕ, 2009

51. НПБ 105-03, Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности, 2003

52. Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 05.02.2018)

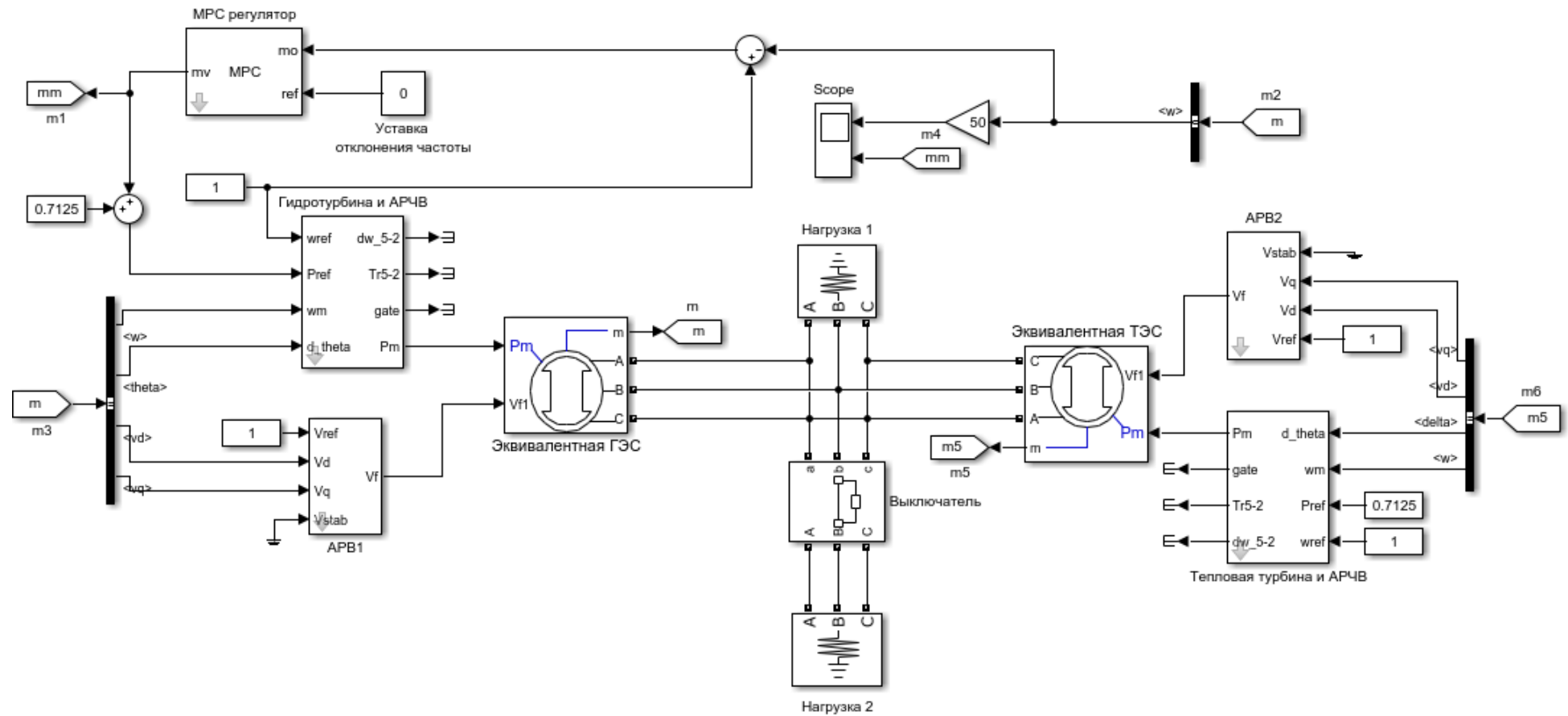
53. ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя, 2017

54. ПРАВИЛА УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК. Седьмое издание, 2002

55. Wikipedia [Электронный ресурс] – URL: <https://it.wikipedia.org/wiki/Software-in-the-loop>, Software-in-the-loop, Дата обращения: 05.04.2018

56. Стандарт: Обеспечение согласованной работы систем автоматического регулирования частоты и перетоков мощности ЕЭС России и автоматики управления мощностью гидроэлектростанций. Условия организации процесса. Условия создания объекта. Нормы и требования, АО «СО ЕЭС», Москва 2010

Приложение А: Схема модели Кольской энергосистемы в MATLAB



Приложение Б: Код расчетного модуля MPC регулятора на языке программирования MATLAB

```
% Задание объекта регулирования как SISO объект в дискретном времени класса  
% LTI в уравнений пространства состояний
```

```
A=[-(1/Tj) 1/Tj 0; 0 1/Tt 1/Tsm; -(1/R*Tcm) 0 -(1/Tsm)];  
B= [0; 0; 1/Tsm];  
C = [1 0 0];  
D = 0;  
plant = ss(A,B,C,D);  
plant = c2d(plant,Ts);  
nump = get(plant, 'num'); nump = nump{:}; % Получение полинома числителя ПФ  
denp = get(plant, 'den'); denp = denp{:}; % Получение полинома знаменателя ПФ  
nnump = length(nump)-1; % Степень полинома числителя объекта регулирования  
ndenp = length(denp)-1; % Степень полинома знаменателя объекта регулирования  
if nump(1)~=0, error ('Plant must be strictly proper'), end;  
if any(abs(roots(denp))>1), disp('Warning: Unstable plant'), end
```

```
% Задание математической модели объекта как SISO систему в дискретном времени  
класса  
% LTI в виде передаточной функции
```

```
model = plant; % Приравнивание переменной 'model' к переменной 'plant'  
model = tf(model); % Присвоение переменной 'model' к значению передаточной  
функции  
numm = get(model, 'num'); numm=numm{:}; % Получение полинома числителя ПФ  
denm = get(model, 'den'); denm=denm{:}; % Получение полинома знаменателя ПФ  
nnumm = length(numm)-1; % Степень полинома числителя модели  
ndenm = length(denm)-1; % Степень полинома знаменателя модели  
if numm(1)~=0, error ('Model must be strictly proper'), end;  
if any(abs(roots(denm))>1), disp('Warning: Unstable model'), end  
nump = [zeros(1, ndenp-nnumm-1), numm];  
numm = [zeros(1, ndenm-nnumm-1), numm];
```

```
% Функция step используется, чтобы рассчитать отклик на шаговое  
% воздействие на модель на всем горизонте прогноза  
stepresp = step(model,0:Ts:max(P)*Ts);  
S = zeros(length(P),M); % Матрица ступенчатых откликов  
% Заполнение матрицы 'theta'  
for j=1:length(P)  
    S(j,:)=[stepresp(P(j):-1:max(P(j)-M+1,1))',zeros(1,M-P(j))];  
end  
S = stepresp(P);
```

```
% Расчет отклонения между значением выхода модели и объекта регулирования  
% в точке совпадения (Экспоненциальный подход желаемой траектории к уставке)  
errfac = zeros(length(P),1);
```

```
%%%%%%%%%%%%%% Параметры моделирования  
tend =100*Ts;
```

```
nsteps = floor(tend/Ts); % (Число шагов моделирования)
```

```
tvec= (0:nsteps-1)*Ts; % Матрица - вектор точек времени
```

```
% Задание вектора с уставочной траекторией (По умолчанию = 1)  
setpoint = ones(nsteps+max(P),1);
```

```

%Задание векторов, хранящих входные и выходные сигналы, изначально все
%параметры равны 1
uu = zeros(nsteps,1); % Вход
yp = zeros(nsteps,1); % Выход объекта регулирования
ym = zeros(nsteps,1); % Выход модели

%Начальные условия
umpast = zeros(ndenm,1);
uppast = zeros(ndenp,1);
ympast = zeros(ndenm,1); % Для отклика модели
ympast = zeros(ndenp,1); % Для отклика объекта регулирования

%%%%%%%%%%%%%%Моделирование
for k=1:nsteps
    % Определение желаемой траектории в точке совпадения
    errornow = setpoint(k)-yp(k);
    reftraj = setpoint(k+P)-errornow*errfac;
    % Свободный отклик модели на всем горизонте прогноза
    yfpast = ympast;
    ufpast = umpast; % переменная хранит последние значения входов модели
    for kk=1:max(P)
        ymfree(kk) = numm(2:nnumm+1)*ufpast-denm(2:ndenm+1)*yfpast;
        yfpast=[ymfree(kk);yfpast(1:length(yfpast)-1)];
        ufpast = [ufpast(1);ufpast(1:length(ufpast)-1)];
    end

    if k>1
        dutraj = S\'(reftraj-ymfree(P)'); % Расчет оптимального значения
        дельтаU
        % и формирование нового входа объекта регулирования u(k) которое
        % находится в переменной uu(k)
        uu(k)= dutraj(1) + uu(k-1);
    else
        dutraj = S\'(reftraj-ymfree(P)');
        uu(k) = dutraj(1)+ umpast(1);
    end

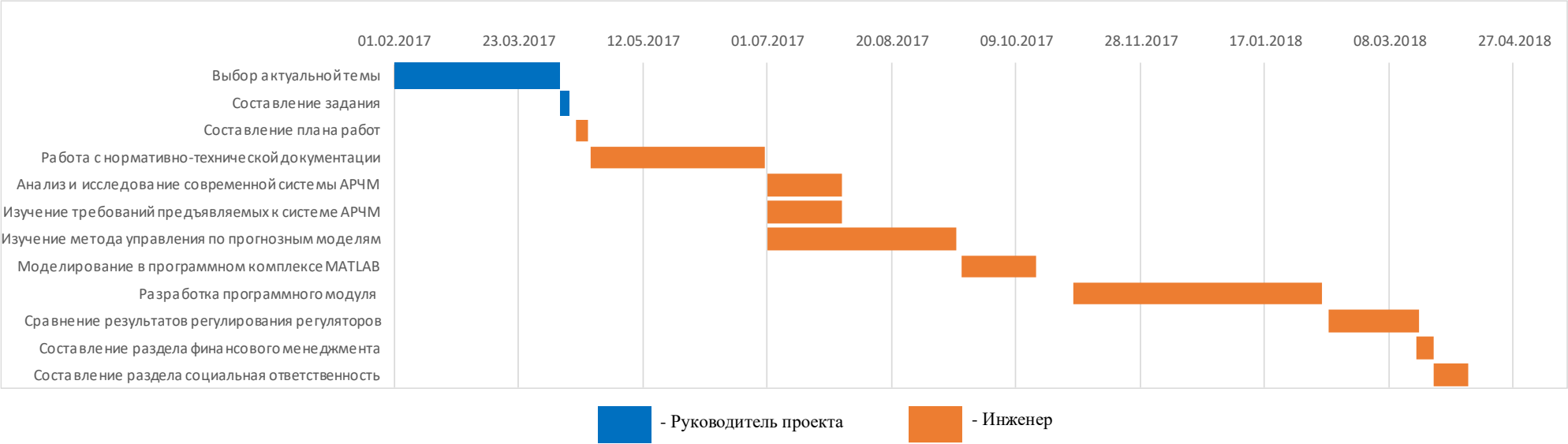
    %%% Расчет выходного значения измеряемой величины
    %объекта регулирования
    uppast = [uu(k); uppast(1:length(umpast)-1)];
    % Расчет выхода объекта регулирования для шага y(k+1)
    yp(k+1) = -denp(2:ndenp+1)*ympast+nump(2:nump+1)*uppast;
    % Обновление последнего выхода объекта регулирования
    ympast = [yp(k+1);ympast(1:length(ympast)-1)];

    %%% Расчет выходного значения измеряемой величины
    %математической модели
    % Расчет выхода модели для шага y(k+1)
    umpast = [uu(k);umpast(1:length(umpast)-1)];
    ym(k+1)= -denm(2:ndenm+1)*ympast+numm(2:nnumm+1)*umpast;
    % Обновление последнего выхода модели
    ympast = [ym(k+1);ympast(1:length(ympast)-1)];

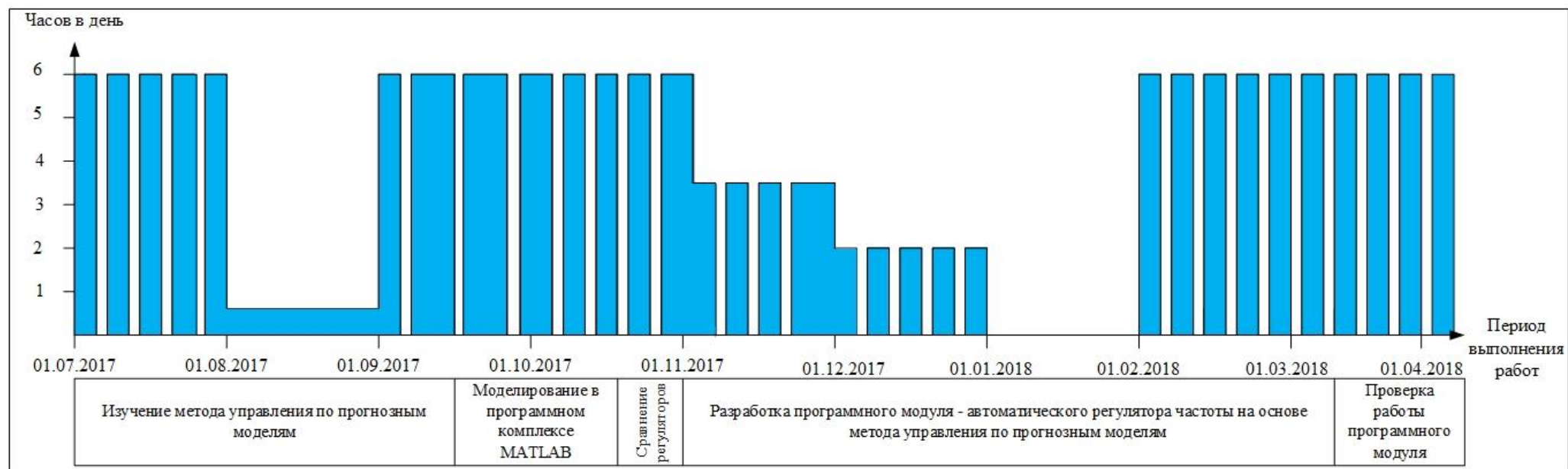
end % конец моделирования

```

Приложение В: Диаграмма Ганта



Приложение Г: График загрузки исполнителя работ



Приложение Д

Automatic generation control with model predictive control

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Д	Беляев Александр Сергеевич		

Консультант ОЭЭ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Прохоров А.В.	К.Т.Н.		

Консультант – лингвист ОИЯ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Матухин Д.Л.	К.П.Н.		

Introduction

Nowadays automatic generation control (AGC) is used to maintain the rated frequency value and overflow predetermined values in Russian united power system. The main component of AGC system is a classical I controller, which forms control action value proportional to integral of control parameter deviation from assigned value within period of time.

I controller implemented in AGC provides a simple solution of frequency and overflow control problem. However, the increasing number of control power plants and AC-lines requires controllers to be more complicated.

High requirements to frequency control quality determines the urgency of AGC development. One of the solutions – Model predictive control (MPC).

This project is devoted to researching of Model predictive control and programming module design – MPC controller. MPC controller handles the frequency automatic control task in isolated power system.

Model Predictive Control

Model Predictive Control (MPC) is of the modern methods in theory of automatic control for complicated technological processes. Implementation of model predictive control can provide potential for development of Automatic generation system (AGS).

The main advantage of MPC is prediction of controlled parameter behavior on some future discrete time interval. It is also possible to correct (recount) calculations for each next step of calculation and it is provided by feedback. This idea gives us opportunity to manage multidimensional and multiconnected objects with complicated structure, for example, heat or hydro turbine, and to optimize processes online, allowing disturbances in system. The main MPC feature is using mathematical model of object control for calculating control action [1].

The principal idea of MPC

Figure 1 describes the principal idea of Model Predictive Control:

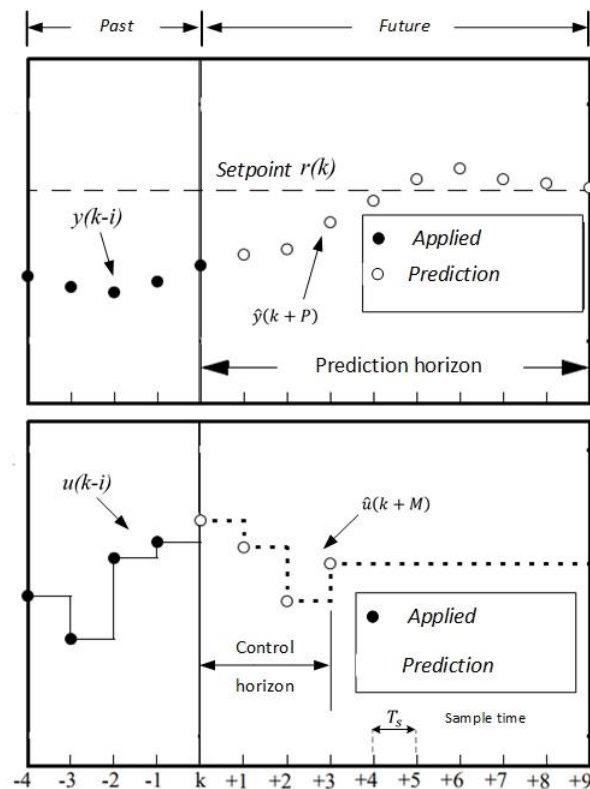


Figure 1 – Principal idea of MPC

1. There is a measured signal $y(k)$ and control parameter setpoint $s(k)$ entering in controller input at the moment of time $-k$.
2. Then MPC controller counts control strategy on prediction horizon $[k, k + P]$ using linearize mathematical model. Prediction horizon is divided into equal discrete steps of time T_s .
3. Then, output signal of MPC controller (control action) changes the value of control parameter, transferred from point $y(k)$ to $y(k+1)$
4. A new control parameter value $y(k+1)$ enters at MPC controller input and control parameter trajectory is recalculated, beginning at next point of time $-k+1$.
5. Prediction horizon continues to shift with sample time T_s .

MPC Algorithm

MPC algorithm includes mathematical model, which describes behavior of control object. Commonly state-space model describes by nonlinear differential equations:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (1)$$

$$y = Cx \quad (2)$$

$x \in \mathbb{R}^n$ – state-space vector; $y \in \mathbb{R}^m$ – vector of output values; $u \in \mathbb{R}^p$ – vector of control action; A, B, C – matrices are of appropriate size and denoting state matrix, input matrix, and output matrix, respectively.

It is comfortable to use system of equations 1 and 2 in discrete form for MPC algorithmization and integration program module – MPC controller with data transmission tools [2]:

$$x_{k+1} = Ax_k + B_u u_k \quad (3)$$

$$y_k = Cx_k \quad (4)$$

For calculation optimal control action, MPC controller gets current system state-space and setpoint of control variable. MPC controller calculates predictive value of control variable and predictive value of control action on each sample time step, using mathematical model of control object.

The research object is simply single machine energy system. The active power of generator is 10 MWt, the active power of load is $0,75 \cdot P_{rate_G}$:

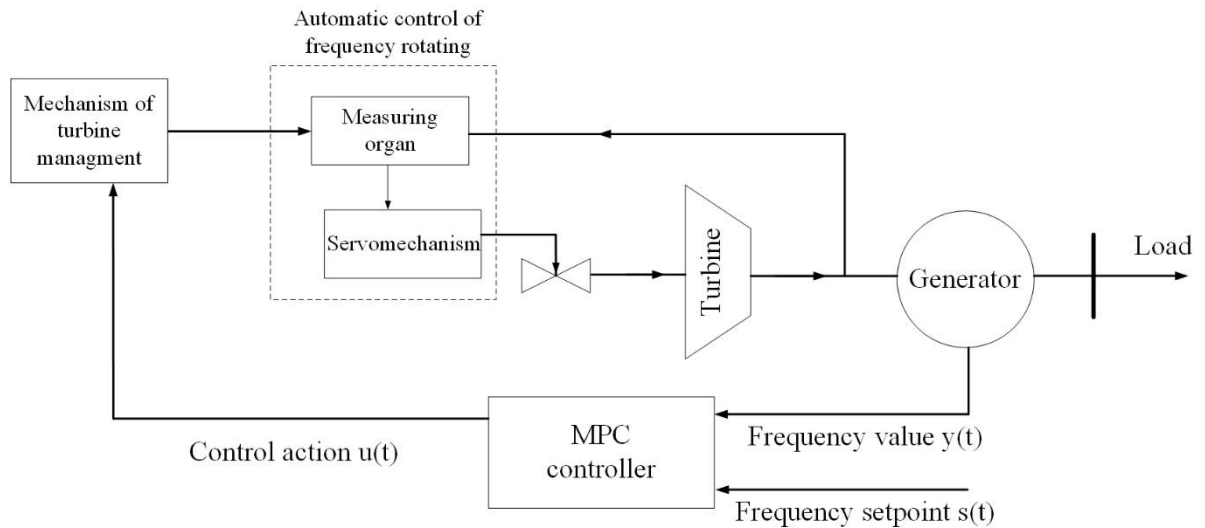


Figure 2 – Control object structure

Multidimensional dynamic state-space models are implemented by linearization of differential equations which describes processes in multidimensional nonlinear control objects. There is simple linearize model of control object which is implemented by transfer functions blocks of main equipment as generator, turbine, servomechanism:

Table 1: Equipment's transfer functions

Object	Transfer function	Discription
Generator	$W_G = \frac{1}{T_j p + 1}$	T_j – equivalent constant of mechanical inertia of turbine-generator
Turbine	$W_T = \frac{1}{T_T p + 1}$	T_T – turbine inertia constant
Servomechanism	$W_S = \frac{1}{T_S p + 1}$	T_S – servomechanism inertia constant

The scheme of control object and its mathematical model as part of MPC controller are shown at figure 3:

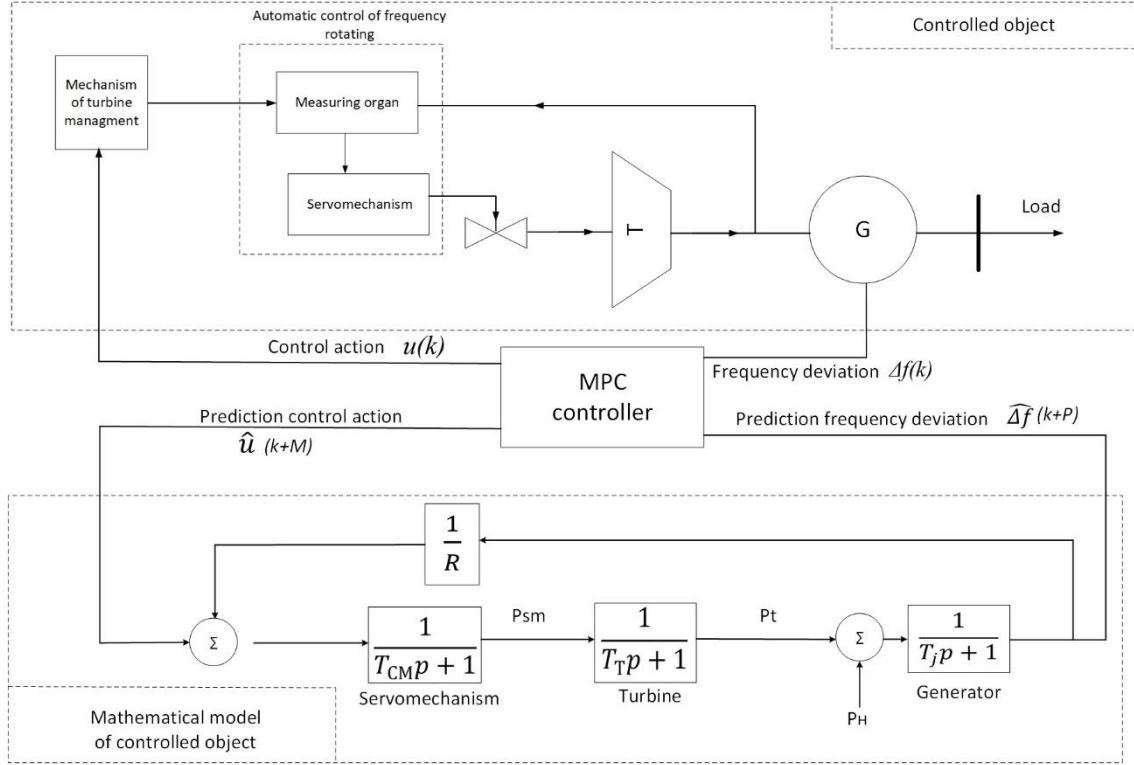


Figure 3 – Control object scheme

Δf – frequency deviation signal

P_T – turbine power value

ΔP_{SM} – servomechanism control action

R – speed droop characteristic

The equation of turbine-generator motion is a basis in controlling frequency in power engineering systems. These equations can be obtained from equation of rotating torques:

$$M_e + M_j = M_T \quad (5)$$

Where M_e – generator electromagnetic torque, M_j – insertional force torque, M_T – turbine torque.

Express the equation (8) as below:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_T - M_E \quad (6)$$

Where ω – angular frequency of rotation of the machine shaft, J – moment of inertia of the rotating mass.

Then, it is necessary to express equation (6) in relative units, taking rated values of frequency ω_{rated} and torque M_{rated} as basis values:

$$J \frac{\omega_{rated}}{M_{rated}} \frac{d\omega_*}{dt} = M_{T*} - M_{E*} \quad (7)$$

The value $J \frac{\omega_{rated}}{M_{rated}} = T_j$ is mechanical time constant of the rotating masses.

So equation (10) is expressed as:

$$T_j \frac{d\omega_*}{dt} = M_{T*} - M_{E*} \quad (8)$$

Torque and active power are interconnected by equation $P = \omega M$. Frequency deviation from nominal value is not significant, so we can approximately change torque values in relative units for active power values in relative units:

$$T_j \frac{d\omega_*}{dt} = P_{T*} - P_{E*} \quad (9)$$

The equations of turbine-generator movement can be used for analyze processes of common synchronous motion of power supply system aggregators. This equation is basis of research transient processes by frequency and active power [3].

Compose state-space equations of model object as per equations (1) and (2). To do that we need value of frequency deviation signal, turbine output value signal and servomechanism output value signal. It is possible using transfer functions for each piece of equipment:

Generator:

$$W_G = \frac{s_{output}}{s_{input}} = \frac{\Delta f}{\Delta P_T} = \frac{1}{T_j p + 1} \quad (10)$$

Where s_{output} is output signal from generator transient function unit, s_{input} is input signal from generator transient function block.

Transform and extract $\Delta f \cdot p$ from (10):

$$\Delta f \cdot p = \frac{\Delta P_T}{T_j} - \frac{\Delta f}{T_j} \quad (11)$$

The equation (11) describes process of frequency change within some period of regulation time. The equation (11) corresponds to equation (9), and if we note that system is single machine, the frequency of rotor rotation is equivalent to frequency of alternative current.

Servomechanism:

$$W_{sm} = \frac{s_{output}}{s_{input}} = \frac{\Delta P_{sm}}{\Delta P_{mpc} - \frac{\Delta f}{R}} = \frac{1}{\Delta T_{sm} p + 1} \quad (12)$$

Transform and express $\Delta P_{sm} \cdot p$ from (12):

$$\Delta P_{sm} \cdot p = \frac{\Delta P_{mpc}}{T_{sm}} - \frac{\Delta f}{RT_{sm}} - \frac{\Delta P_{sm}}{T_{sm}} \quad (13)$$

Turbine:

$$W_t = \frac{s_{output}}{s_{input}} = \frac{\Delta P_t}{\Delta P_{sm}} = \frac{1}{1 + T_t p} \quad (14)$$

Transform and express $\Delta P_t \cdot p$ from (14):

$$\Delta P_t \cdot p = \frac{\Delta P_{sm}}{T_t} - \frac{\Delta P_t}{T_t} \quad (15)$$

So, we have system of equations which describes mathematical model of control object:

$$\begin{aligned} \Delta f \cdot p &= \frac{\Delta P_t}{T_j} - \frac{\Delta f}{T_j} \\ \Delta P_t \cdot p &= \frac{\Delta P_{sm}}{T_t} - \frac{\Delta P_t}{T_t} \\ \Delta P_{sm} \cdot p &= \frac{\Delta P_{mpc}}{T_{sm}} - \frac{\Delta f}{RT_{sm}} - \frac{\Delta P_{sm}}{T_{sm}} \end{aligned} \quad (16)$$

The system of equations (16) can be transformed to discrete type in state-space:

$$\begin{bmatrix} \Delta f(k+1) \\ \Delta Pt(k+1) \\ \Delta Psm(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_j} & \frac{1}{T_j} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_t} & \frac{1}{T_{sm}} \\ -\frac{1}{RT_{sm}} & 0 & -\frac{1}{T_{sm}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta f(k) \\ \Delta Pt(k) \\ \Delta Psm(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_{sm}} \end{bmatrix} \cdot [\Delta P_{mpc}(k)]$$

$$y(k) = [1 \quad 0 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} \Delta f(k) \\ \Delta Pt(k) \\ \Delta Psm(k) \end{bmatrix}$$

Where

$$\text{State-space vector} - x(k) = \begin{bmatrix} \Delta f(k) \\ \Delta Pt(k) \\ \Delta Psm(k) \end{bmatrix}$$

$$\text{Control action vector} - u(k) = [\Delta P_{mpc}(k)]$$

$$\text{Output values vector} - y(k)$$

State-space, control action and output values matrices are expressed as follows:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_j} & \frac{1}{T_j} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_t} & \frac{1}{T_{sm}} \\ -\frac{1}{RT_{sm}} & 0 & -\frac{1}{T_{sm}} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_{sm}} \end{bmatrix} \quad C = [1 \quad 0 \quad 0] \quad (18)$$

Algorithm of control action calculating

Mathematical model can first be used to predict the free response $\hat{y}_f(k + H_p)$ of controlled object, namely the response, if the value of controlled parameter would be obtained on the next trajectory step and remained at the latest level $u(k-1)$.

Let $S(H_p)$ be the response of the model to a unit step input, H_p steps after the unit step is applied. The predicted output at time $k + H_p$ equals

$$\hat{y}(k + H_p) = \hat{y}_f(k + H_p) + S(H_p) \cdot \Delta \hat{u}(k) \quad (19)$$

where

$\Delta \hat{u}(k) = u(k) - u(k - 1)$ is an increment of control action. We want to obtain

$$\hat{y}(k + H_p) = r(k + H_p)$$

So, the optimal input change is expressed as

$$\Delta \hat{u}(k) = \frac{r(k + H_p) - \hat{y}_f(k + H_p)}{S(H_p)}$$

To sum up we can find the value of control action at k step:

$$u(k) = \Delta \hat{u}(k) + u(k - 1)$$

It moves the value of control parameter from point $y(k)$ to point $y(k+1)$. The point $y(k+1)$ becomes current value and calculating starts again.

Conclusion

Master thesis includes three parts: description of AGC architecture and how it works, research of MPC basics and its mathematical algorithm, and MPC controller design which provides automatic frequency regulation in isolated power system.

The first part contains features of AGC realization. Information from this part has been used to design programming module – MPC controller.

The Model predictive control basics have been researched and its algorithm of control action calculation has been applied to solve the frequency regulation problem in a single-machine isolated power system. Frequency regulation efficiency of MPC controller in single-machine power system has been compared with I controller in MATLAB software.

Programming module – MPC controller has been designed using C# and MATLAB programming languages. MPC regulator efficiency has been tested in the modeled power system in Hybrid Real-Time Power System Simulator (H RTPSS).

The outcomes have proven the efficiency of MPC controller as an AGC system in the isolated single-machine power system. It means that MPC controller is one of directions of AGC system development.

References

1. Model Predictive Control with Integral Action: A simple MPC algorithm, Telemark University College: 2005, 13 pp.
2. J.M. Maciejowski, Predictive Control with Constraints: 1997, 22 pp.
3. Weinstein R.A., Shestakova V.V., Katz I.M. Automatic control of power systems in normal and emergency regimes, Tomsk: 2013, 93 pp.